



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

AKI HONKOLA  
HYDRAULIJÄRJESTELMÄN PUHTAUSTASOT TELA-  
ALUSTAISEN MURSKAIMEN VALMISTUKSESSA

Diplomityö

Tarkastajat: professori Kalevi Huhtala  
ja yliopistonlehtori Petteri Multanen  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
1. helmikuuta 2017

## TIIVISTELMÄ

**AKI HONKOLA:** Hydraulijärjestelmän puhtaustasot tela-alustaisen murskaimen valmistuksessa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 44 sivua, 0 liitesivua

Joulukuu 2018

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Hydrauliteknikka

Tarkastajat: Professori Kalevi Huhtala ja yliopistonlehtori Petteri Multanen

Avainsanat: hydraulikka, suodatus, epäpuhtaudet, lisäaine

Hydraulijärjestelmien kehittyessä ja kestoiän merkityksen kasvaessa järjestelmien puhtaudella on entistä suurempi merkitys. Tietoisuus puhtauden tärkeydestä alkaa saavuttamaan valmistavien tehtaiden lisäksi pienetkin asiakkaat. Tästä johtuen tehtaidenkin prosessien läpinäkyvyys tuo lisäarvoa asiakkaalle.

Tämän työn kohdeyrityksessä hydraulijärjestelmien puhtauteen on kiinnitetty huomiota jo pidemmän aikaa. Suuressa organisaatiossa asia ei vain ollut juuri kenenkään vastuulla ja tästä johtuen puhtaudessa ajaututtiin lähes ongelmatasolle. Tehtaalta toimitettavat koneet olivat hydraulijärjestelmien puhtauden suhteen hälytysrajalla ja tämän työn tarkoitus oli etsiä syyt tähän ongelmaan, määritellä korjaavat toimenpiteet ja mahdollisuuksien mukaan toteuttaa ne.

Tutkimustyö aloitettiin laajoilla mittauksilla sekä laboratoriotesteillä. Keskustelua käytiin öljyntoimittajien, öljylaboratorioiden, suodatinvalmistajien, yrityksen eri osastojen ja asiakkaiden välillä. Koneiden hydraulijärjestelmiä tarkasteltiin puhtauden, suodatuksen ja puhtaustamittauksien suorittamisen näkökulmasta. Asentajille ja puhtauden kanssa tekemisissä oleville henkilöille pidettiin tiedotustilaisuuksia ja koulutusta. Tehtaalla kulutettavan ja varastoitavan hydraulioöljyn suodatusta parannettiin ja dokumentoitiin ohjeet suodatuksen valvontaan.

Työn käytännön osuuden tueksi tutkittiin epäpuhtauksien aiheuttamien haittojen teoriaa sekä mittauksiin liittyviä standardeja ja tutkimuksia. Kun ongelma paljastui lisäainelähtöiseksi, lisättiin teoriaosuuteen standardi tämän ongelman kiertämiseksi. ASTM D7647 -menetelmästandardia sovellettiin myös tehtaan omissa mittauksissa onnistuneesti.

## ABSTRACT

**AKI HONKOLA:** Cleanliness of the Hydraulic System in the Production of Track Mounted Crusher

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 44 pages, 0 Appendix pages

December 2018

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Fluid Power

Examiners: Professor Kalevi Huhtala and University Lecturer Petteri Multanen

**Keywords:** hydraulics, filtration, contaminants, additive

The cleanliness of hydraulic systems becomes even more meaningful when the systems complexity and valuation of long life span increase. Knowledge about the importance of cleanliness is reaching even the smallest customers along with the manufacturing plants. Because of this the transparency of manufacturing processes brings added value to the customer.

The target company of this thesis has paid attention to the cleanliness of hydraulic systems for long. In a large organization the matter has been on true responsibility of practically nobody. Hence the cleanliness levels almost hit the problem level. The cleanliness levels of delivered machines were on alert limit and the purpose of this thesis work was to investigate the root causes of this problem, define the corrective actions and to implement them as far as possible within time schedule.

The investigation commenced with extensive measurements and laboratory tests. The discussion was held with the oil suppliers, the oil laboratories, the filter manufacturers, the different departments of the company and the customers. The hydraulic systems of the machines were examined with the aspects of cleanliness, filtration and the carrying out of the cleanliness measurements. Training and guidance was held for the assemblers and for the people involved with the cleanliness of the systems. The filtering of the hydraulic oil used at the manufacturing plant was improved and instructions were made for long term monitoring of the filtration.

To support the practical part of the thesis theory on contaminant affects and measurement standards and studies were examined. As the problem was revealed to be additive based a procedure standard to cancel the problem was attached to the theory part of the work. ASTM D7647 standard was implemented successfully in the manufacturing plants own measurements.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereella Metso Minerals Oy:ssä. Työorganisaationi on ollut Toiminnan kehitys, joka on osa Tampereen tehtaan tuotanto-organisaatiota. Työn aikana juhlittiin yrityksen 100-vuotistaivalta ja tätä kunnioittaen yrityksen historiaa käsitellään hieman laajemmin. Diplomityöprojekti sisälsi suuren määrän käytännön työtä puhtausmittausten, selvitystöiden sekä uuden öljyn suodatusratkaisujen parantamisen parissa.

Siirryin kehitystiimiin mobileseulasuunnittelusta ja on ollut mielenkiintoista nähdä sekä suunnittelun että tuotannon erilaiset näkökulmat toimintatapoihin. Toimin työni aikana tiedonsiirtokanavana tuotannon ja suunnittelun välillä. Työn kirjallisen osion valmistumisen aikana siirryin takaisin suunnitteluun hydraulikka- ja voimansiirto-osastolle, joten olen päässyt hyödyntämään ja jakamaan työn aikana kertynyttä tietoutta.

Työni valvojana Metsolla on toiminut kehitysinsinööri Janne Mäkipää (DI), jota haluan kiittää avusta, hyvästä projektinjohdosta ja perehdytyksestä ison talon tuotannollisiin asioihin. Professori Jari Rinkistä Tampereen teknillisen yliopiston Hydrauliiikan ja automatiikan laitokselta haluan kiittää ohjeista ja neuvoista sekä saaduista tutkimustuloksista. Laitoksen professori Kalevi Huhtalaa ja yliopistonlehtori Petteri Multasta kiitän työni tarkastamisen lisäksi projektin aikana saadusta tuesta ja ohjeistuksesta.

Viimeiseksi haluan kiittää kaikkia Metso Minerals Oy:n työntekijöitä, jotka ovat edistäneet työni valmistumista ja joiden kanssa olen keskustellut ja saanut paljon arvokasta tietoa työhöni liittyen.

Tampereella, 20.11.2018

Aki Honkola

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	METSON HISTORIA JA NYKYPÄIVÄ .....	2
2.1	Metson historia.....	2
2.2	Nykypäivä ja hydrauliiikan käyttö .....	5
2.3	Työn ongelmakuvaus .....	8
3.	HYDRAULIJÄRJESTELMÄN PUHTAUS .....	9
3.1	Epäpuhtauksien aiheuttamat haitat.....	12
3.1.1	Abrasiivinen kuluminen.....	13
3.1.2	Adhesiivinen kuluminen .....	14
3.1.3	Eroosiokuluminen .....	15
3.1.4	Pintaväsymismurtuminen.....	15
3.1.5	Nestemäiset- ja kaasumaiset epäpuhtaudet .....	16
3.1.6	Kemialliset epäpuhtaudet .....	17
3.2	Puhtaustasojen mittaaminen ja standardit .....	17
3.2.1	Mittaustavat.....	18
3.2.2	ISO4406:2017 .....	19
3.2.3	ASTM D7647-10 .....	20
3.3	Uuden öljyn puhtaus.....	21
3.4	Komponenttipuhtaus .....	22
3.5	Järjestelmäpuhtauteen vaikuttavat asiat .....	22
3.6	Puhtauden parantamiskeinot tuotannossa.....	23
3.7	Epäpuhtauksien vaikutus turvallisuuteen .....	23
4.	NYKYTILANNE MURSKAIMEN HYDRAULIJÄRJESTELMÄN PUHTAUDESSA.....	25
4.1	Järjestelmäkuvaus.....	25
4.2	Asetettu puhtaustasovaatimus .....	25
4.3	Saavutettu puhtaustaso .....	26
4.4	Tuotannon eri vaiheet.....	26
4.5	Tehdasympäristö ja työtavat.....	28
4.6	Häiriöt tuotannossa.....	29
5.	SUORITETUT TUTKIMUKSET JA TULOKSET HYDRAULIJÄRJESTELMÄN PUHTAUDESTA.....	30
5.1	Hydrauliletkujen puhdistus .....	30
5.2	Puhtaamman öljyn tankkaaminen järjestelmään .....	31
5.3	Erilaisten suodattimien vaikutus .....	32
5.3.1	Parannettu paluusuodatus.....	32
5.3.2	Erilaiset painesuodattimet .....	33
5.4	Korjaavat toimet.....	34
5.4.1	Kustannustehokkaiden toimien valinta .....	34

5.4.2	Valittujen toimien käynnistys ja todennus .....	35
5.5	Hydrauliöljyn lisäaineistuksen vaikutus.....	36
6.	TULOSTEN ANALYSOINTI JA JATKOTOIMENPITEET .....	39
6.1	Tutkimustuloksien vertailu.....	39
6.2	Jatkotoimenpiteet .....	40
6.2.1	Puhtauden seuranta .....	41
6.2.2	Suositus mittauksien laajentamiseksi.....	41
7.	YHTEENVETO .....	42
	LÄHTEET .....	43

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ISO4406	Standardi nesteen puhtausluokan ilmoittamiseksi. Jos vuosinumeroa ei ole mainittu, kyseessä on käytössä oleva standardiversio ISO4406:2017.	
ISO4406:1987	Vanha vuoden 1987 standardiversio, jossa myös hiukkasen koko mitataan eri tavalla kuin vuoden 1999 ja 2017 versioissa.	
Lokotrack	Tela-alustainen liikuteltava murskauslaitos.	
MoMod	Moottorimoduuli eli diesel- tai sähkömoottorin sekä voimansiirron komponentteja sisältävä osakokonaisuus, joka voidaan nostaa valmiina Lokotrackin rungolle.	
Offline -mittaus	Järjestelmän ulkopuolella tapahtuva nestenäytteen analysointi	
Online -mittaus	Järjestelmään kytkeytyneenä tapahtuva nestenäytteen analysointi	
Inline -mittaus	Järjestelmään integroituna tapahtuva nestenäytteen analysointi	
$C_d$	Hiukkasten kappalemäärä liuottimessa	$[kpl/cm^3]$
$C_{s,n}$	Näytteen kumulatiivinen hiukkasten kappalemäärä kokoluokassa $n$	$[kpl/cm^3]$
$C_{t,n}$	Liuotetun näytteen kumulatiivinen hiukkasten kappalemäärä kokoluokassa $n$	$[kpl/cm^3]$
$D_{r,s}$	Laimennuskerroin näytteen suhteen	$[-]$
$D_{r,d}$	Laimennuskerroin liuottimen suhteen	$[-]$
$M_s$	Näytteen massa	$[g]$
$M_d$	Liuottimen massa	$[g]$
$n$	Hiukkaskokoluokka	$[\mu m]$
$P_s$	Näytteen tiheys	$[g/cm^3]$
$P_d$	Liuottimen tiheys	$[g/cm^3]$

# 1. JOHDANTO

Hydraulijärjestelmien puhtauteen on muutamina viime vuosikymmeninä kiinnitetty koko ajan enemmän huomiota. Hydraulikomponentit ja -järjestelmät ovat kehittyneet ja tietoisuus epäpuhtauksien aiheuttamista haitoista on lisääntynyt. Kiinteät epäpuhtaudet aiheuttavat komponenttien kulumista ja suurempina hiukkasina myös äkillisiä järjestelmän toimintahäiriöitä. Nesteet ja kaasumaiset epäpuhtaudet heikentävät hydraulinesteen kemiallista koostumusta sekä ohentavat voitelukalvoa komponenttien eri osien välillä ja aiheuttavat siten kulumista ja energiahäviöitä.

Taloudellisen tilanteen kiristyessä ja kilpailun kasvaessa on koneiden huolto- ja korjauskustannuksia alettu seurata isojen toimijoiden lisäksi entistä pienemmissä yrityksissä. Turhien kulujen karsiminen on kaikkien tavoitteena. Hydraulisissa koneissa hydraulijärjestelmien puhtauden hyvä taso auttaa säästämään huolto- ja korjauskustannuksissa. Puhdas järjestelmä kuluu vähemmän ja korjausta vaativia komponenttirikkoja tapahtuu harvemmin. Koneiden valmistajalle puhtaasti koottu hydraulijärjestelmä tuo säästöjä ongelmattoman järjestelmän käyttöönoton ja ensimmäisten käyttötuntien muodossa sekä takuuvikojen vähäisempänä määränä. Koneisiinsa tyytyväiset asiakkaat ovat valmistajalle tietenkin tärkeitä toiminnan jatkuvuuden suhteen.

Kohdeyrityksessä hydraulijärjestelmien puhtaustasoon on kiinnitetty kohtalaisesti huomiota. Puhtautta on mitattu tuotannon loppuvaiheessa tehtävässä koekäytössä sekä satunnaisesti tuotannon muista vaiheista ja asiakkaiden käytössä olevista koneista. Koekäytössä saadut puhtausmittaustulokset alkoivat ylittää hälytysrajan ja syyn selvittämiseksi perustettiin projekti hydraulijärjestelmien puhtauden saattamiseksi takaisin halutulle hyvälle tasolle. Tähän projektiin päätettiin teettää diplomityö. Diplomityön pää tavoitteena on analysoida hydraulijärjestelmien puhtautta ja selvittää epäpuhtauksien lähteet ja -tyyppi sekä niiden merkitys käytännössä ja mahdollisuuksien mukaan toteuttaa ja seurata korjaavia toimenpiteitä.

Tämä diplomityö on tehty Metso Minerals Oy:n Toiminnan kehitys -osastolla, eli pääasiallisena lähestymistapana asioihin on tuotannon näkökulma. Tuotannon käytäntöjä hydraulijärjestelmien puhtaudessa haluttiin parantaa entisestään osa-alueilla, joilla merkittävää parantamista oli. Resurssien puitteissa tehtiin myös mittausta ja tutkimusta suunnittelun ja tuotehallinnan tarpeita sivuten.



## 2. METSON HISTORIA JA NYKYPÄIVÄ

### 2.1 Metson historia

Veturitehdas Oy Lokomo Ab perustettiin Tampereelle vuonna 1915. Lokomon konepaja sekä terästehdas rakennettiin Hatanpään kartanon maille 1915–1916. Terästehtaalle hankittiin heti valokaariuuni, joka oli maailmallakin tuohon aikaan vielä harvinaisuus. Seosteräksien valamiseen tarvittavan puhtaan muottihiekan valmistukseen hankittiin myös kivenmurskain. Sen kulutusosiin aloitettiin kovamanganiteräksen valaminen. Myös laivanpotkureiden valmistus aloitettiin ensimmäisten tuotteiden joukossa. Näitä tuotteita valettiin Lokomolla vuoteen 2015 saakka, jolloin terästehdas myytiin TEVO Oy:lle. (Törmä 2015, s. 10, 210) TEVO edelleen jatkaa näiden tuotteiden valmistusta.

Varsinainen veturituotanto käynnistyi vuonna 1918 viiden Yhdysvalloista tilatun K4-tavaraliikenneveturin kokoamisella. Vuonna 1920 valmistui kahdeksan Lokomon omaa H8-veturia. Alkuvuosina veturituotanto oli vaikeuksissa kovan ulkomaisen kilpailun takia. Tästä johtuen tuotantoa ohjattiin myös moniin muihin tuotteisiin. (Törmä 2015, s. 21–24)

Konepajalla valmistettiin vatureiden lisäksi lähes alusta lähtien tientekokoneita, kaasugeneraattoreita, turvekoneita ja alasimia. Vuonna 1918 sisällissodan aikana Lokomon tehdas toimi lähes koko sodan ajan ja sinne keskitettiin vatureiden korjaustoiminta. Kirkonkelloja valmistettiin 369 kappaletta viimeisen valmistuessa vuonna 1969. (Törmä 2015, s.24, s.15, s.19)

Lokomon konepajan ja tulevan Metson elinvoimaisuuden kannalta merkittävimmän tuoteryhmän valmistus alkoi vuonna 1921, kun kivenmurskaimien ja silloisten rumpulajittelijoiden omat mallit julkistettiin. 1920-luvun alun lamasta selvitettiin ja 1926 valmistettiin kolmea erimallista veturia yhteensä 13 kappaletta. Samana vuonna aloitettiin ruostumattoman teräksen valmistus ensimmäisenä Suomessa. Vuonna 1929 leukamurskaimista muodostettiin tuoteperhe neljällä mallilla. (Törmä 2015, s. 26–35)

Sadas veturi valmistui vuonna 1930 laman keskellä. Lisenssillä valmistettiin moottorivatureita, kompressoreja, lautasmurskaimia, lämminvesilaitteita ja lämmityskattiloita. Vuonna 1932 solmittiin myös sopimus ruotsalaisen teräsyhtymän kanssa haponkestävien, ruostumattomien ja tulenkestävien terästen valmistuksesta. Muutenkin terästehtaan investoitiin ja seostettujen terästen valamisessa sekä lämpökäsittelyssä päästiin hyviin lopputuloksiin. 1930-luvulla sotatarviketeollisuus alkoi muodostua merkittäväksi tuotantosuunnaksi. Puolustuslaitokselle toimitettiin laatuteräksiä tykkeihin, asetehtaille

valmistettiin kiväärinpiippuaihioita, kranaatinkuoria ja patruunanvalmistuskoneita sekä kumiteollisuudelle kaasunaamarinmuotteja. (Törmä 2015, s. 41–47) Vuosina 1935–1936 valmistettiin höyryakkumulaattorivetureita, puiden kuorimakoneita, hiilimurskajia sekä tykinputkia. Tiehöylissä siirryttiin ilmakumipyöriin ja moottorivetureita sekä paineilmakompressoreja alettiin varustaa dieselmoottorilla. Murskaustuotteissa hankittiin hienomurskaajan valmistuslisenssi, koska havaittiin, että hienon kivimurskeen tarve lisääntyi tienrakennuksessa, asfaltoinnissa ja betoniteollisuudessa. Veturimallistoon tuli uusi raskas pikajunaveturi ja veturimallisto sai tunnustusta kansainvälisestikin. Vuonna 1937 solmittiin Puolustusministeriön kanssa sopimus kaikkien Suomesta hankittavien tykinputkien valmistamisesta ja rakennettiin tätä varten takopuristinlaitos. (Törmä 2015, s. 53–56)

Talvisodan syttyessä 1939 Lokomolla osa toiminnoista järjestettiin toimimaan vuorokauden ympäri ja useimmat toiminnot kahdessa 10 tunnin vuorossa. Asetetut tuotantotavoitteet sotatarvikkeille saatiin hyvin täytetyiksi. Vuosina 1940 ja 1941 valimon toimintaan investoitiin ja tehtiin valtion vaatimat selvitykset tuotannon tilasta. Jatkosodan aikana naistyöntekijöiden määrä kasvoi reilusti ja heitä työskenteli paljon sorvaamalla. Sodan jatkuessa seosmetalleista oli pulaa ja väliaikaista helpotusta saatiin tuonnilla Saksasta. Sotien aikana Lokomolla valmistettiin erilaisia panssarointeja, aseiden piippuaihioita ja muita osia, ammustelineitä, telaketjun tappeja, ampuma-aukkojen kehyksiä, tykkien putkia ja putkiaihioita, lentokoneiden osia, patruunakoneita, potkureita ja tavarajunavetureita. Käsiaseiden piippuaihioita toimitettiin 371 430 kappaletta. Tehtaan toimiiin kuului myös panssarivaunujen, tykkien ja vetureiden huolto ja korjaus. (Törmä 2015, s. 59–65)

Sotakorvaustuotteiden valmistaminen muutti tehtaan tuotantotapoja. Tehtäväksi tulleen 293 kapearaideveturin valmistaminen vaati siirtymisen sarjatuotantoon. Neuvostoliittoon toimitettiin myös murskaimia, ankkureita, haponkestäviä venttiilejä sekä teräsvaluja ja takeita muille sotakorvaustuotteiden valmistajille. Valujen laaduntarkastukseen hankittiin vuonna 1951 Suomen metalliteollisuuden ensimmäinen ultraäänilaite. Veturien kokoonpanossa siirryttiin hitsaamiseen ja hitsisaumojen tarkastusta varten rakennettiin uusi röntgenlaitos. Sotakorvaustoimitukset onnistuivat hyvin ja viimeiset suoritettiin vuonna 1952.

1950-luvulla kehitettiin sarjatuotantoa ja standardoituja konemalleja Teräsmies-kaivukoneilla, Teräskarhu-tiehöylillä ja Teräskita-murskaimilla. Sarjatuotannon peruskivi olivat haponkestävät venttiilit. Ulkomaanvientiä käynnistettiin tiehöylillä sekä –jyrillä. Veturituotannossa vuosikymmen oli historiallinen. Viimeinen höyryveturi luovutettiin vuonna 1957 ja ensimmäinen dieselveturi jo vuonna 1953. Uudelle tärkeälle uralle Lokomolla lähdettiin vuonna 1954, kun aloitettiin metsäoja-aurojen valmistus. Vuosikymmenen lopussa murskaimissa kehitettiin uusi raskas malli MK 120. Tehdasrakennuksia laajennettiin merkittävästi ja sarjatuotantoon suunniteltu Kokoonpanotehdas rakennettiin. (Törmä 2015, s. 89-96, 113)

Vuonna 1960 perustettiin Lokomon konepajakoulu, koska ammattitaitoisesta työvoimasta oli pulaa. Koulu toimi vuoteen 1985 asti ja lakkautettiin virallisesti 1990-luvun lopulla. 1960-luvulla keskityttiin tuotekehitykseen, markkinointiin ja kansainvälistymiseen. Jo vuosikymmenen alussa vientiin meni 34 % tuotannosta. Myös 500:s veturi valmistui ja kotimaahan toimitettiin useita dieselhydraulisia vetureita sekä aloitettiin dieselsähköisten vetureiden lisenssivalmistus. Kaivukoneita valmistettiin viittä mallia osin paineilmaohjauksella. Tiehöyliä oli sarjatuotannossa kolmea mallia ja hydrauliset ohjaustehostimet tulivat käyttöön. Vuosikymmen puolivälissä toimitettiin 1000:s tiehöylä sekä kehitettiin pohjoismaiden ensimmäinen siirrettävä, elementeistä koottava ja pölynpoistolaitteilla varustettu sora- ja murskausasema. Tuotevalikoimaan kuuluivat myös puuhakkureita, syöttimiä, hakelämmityskattiloita sekä venttiilejä hydraulilla, pneumaattisilla ja sähköisillä kauko-ohjauslaitteilla. Uutta tekniikkaa edusti dieselmoottorilla ja hydraulisella voimansiirrolla varustettu siirrettävä seurlontavaunu sekä 30 % tavallista tehokkaampi horisontaaliseula. Vuosikymmenen lopulla valimon tuotteiden kysyntä ylitti toimitusmahdollisuudet ja Lokomon vakiotuotteisiin hankittiin valuosia ulkomailta. Myös murskaus- ja seurlontalaitteissa tehtaan tuotantokapasiteetti oli rajoitteena. Vuonna 1968 esiteltiin uusi murskaintyyppi, karamurskain. Kaksi mallia tuotiin sarjatuotantoon 11 vuoden testien jälkeen. Vuotta myöhemmin jyrätuotannolle tehtiin oma osastonsa ja Bomag-täryjyrien myynti kasvoi merkittävästi. Samaan aikaa hydraulikan käyttö lisääntyi merkittävästi ja tiehöylästä tuli hydraulisten lisälaitteiden kanssa maanrakennustöiden yleiskone. (Törmä 2015, s. 101–117)

Vuonna 1966 esiteltiin moderni mallisarja täyshydraulisia mobiilinostureita. 1960-luvun puolivälin jälkeen mekaaniset tehonsiirrot korvattiin suuressa osassa koneita hydraulilla järjestelmillä. Vaatimukset täyttäviä komponentteja oli heikosti markkinoilla, joten Lokomo perusti Helsinkiin Hydraul Oy -nimisen hydraulikkaosaston. Vuonna 1968 esiteltiin ensimmäinen metsätraktori. (Törmä 2015, s. 116–121)

1970-vuonna tulevaisuuden ennustaminen kävi epävarmemmaksi ja Lokomo fuusioitui Rauma-Repola Oy:öön. Vuonna 1971 Hydraul Oy:n toiminnot siirrettiin Lokomolle Huoltokorjaamon tiloihin. Aluksi hydraulikkatuotantoa myytiin ulkopuolisillekin, mutta 1970-luvun puolivälissä tuotanto kohdistettiin omiin tuotteisiin. Vuonna 1974 Lokomolla kerrottiin tulevaisuuden näkymiä ja tehdastilojen ja tuotannon laajentumisen koh-

distuvan voimakkaasti hydraulisiin nostureihin, metsäkoneisiin, murskauslaitoksiin ja kaivukoneisiin. Vuonna 1972 Rauma-Repola perusti metsäkonetehtaan Joensuuun. (Törmä 2015, s. 123–138) Kyseisellä tehtaalla valmistetaan nykyään John Deere - metsäkoneita.

1970-luvun lopulla hajaantunut tuotetarjonta ja kasvava ulkomainen kilpailu ajoi Lokomon sarjatuotteet ahtaalle ja Rauma-Repolassa katsottiin Lokomon tuotannon sopivan parhaiten raskaisiin teräsvaluihin ja takeisiin. Sarjatuotteissa parhaiten menestyi murskainosasto. Tuotannon järkeistämishjelman perusteella vuonna 1981 perustettiin omat tuotetehtaat nostureille, murskaimille ja meriteknisille tuotteille. Tammikuussa 1982 Rauma-Repola osti Neles-yhtiöt ja toukokuussa myi Neles Oy:lle Lokomon tehtaiden teräs-, murskain-, nosturi- ja meritekniset osastot veroteknisistä syistä. (Törmä 2015, s. 152–155)

Vuonna 1982 Rauma-Repolasta tuli sukelluslaitteiden valmistaja. Maaliskuussa 1983 käynnistettiin Neles Oy Meritekninen tehdas josta tuli Rauma-Repola Oceanics. Samana vuonna aloitettiin Mir 1 ja Mir 2 -tutkimussukellusaluksien suunnittelu Venäjän tiedakatemialle ja ne valmistuivat 1987. Sukelluskyvyllään 6000 metriin ne olivat ainutlaatuisia, eikä tänäkään päivänä vastaavia miehitettyjä aluksia ole saatavilla. Yhdysvaltojen painostuksen myötä sitouduttiin valmistamaan vain nämä kaksi yksilöä. (Törmä 2015, s. 156–175)

Vuonna 1985 tehtaalta tilattiin ensimmäinen tela-alustainen murskauslaitos. Se valmistui 1987 ja Lokotrack näki päivänvalon. Vuonna 1985 perustettiin omana yksikkönään Lokomon hydraulikkatehdas eli Lokomec. Vuonna 1989 Lokomo Oy:n toimintoja selkeytettiin. Lokomo Crushers valmisti kivenmurskaimia, Lokomo Lokotrack tela-alustaisia murskauslaitoksia, Lokomo Parts markkinoi kulutus- ja varaosia murskaimiin ja Lokomo Steels toimitti teräsvaluja. Samalla Lokomosta tuli osa Rauma-Repolan osamaa Nordberg -ryhmää. Vuonna 1996 käynnistettiin uusi Lokotrack-tehdas, jossa tuotantolinja oli jopa 120 m pitkä. Nordberg yhteistyö oli nostanut Lokomon kasvuun. (Törmä 2015, s. 177–194)

Vuoden 1999 alussa Rauma Oy ja Valmet Oy fuusioituivat, jolloin syntyi Metso Oy. Lokomon toiminnot jaettiin kahtia Metso Minerals Oy:öön ja Metso Lokomo Steels Oy:öön. (Törmä 2015, s. 201)

## 2.2 Nykypäivä ja hydrauliiikan käyttö

Merkittävin hydrauliiikan käyttäjä nykypäivän Metsossa on kivenmurskaus-segmentti, jonka osuus yrityksen 3,7 miljardin euron liikevaihdosta oli 22 % vuonna 2014. Myös kaivossegmentti käyttää hydraulisia laitteita ja sen osuus oli 51 % liikevaihdosta. (Metso Yleisesitys 2015) Kuvassa 1 nähdään myös yrityksen muut segmentit ja liikevaihdot.

	<b>Kaivos</b> (kaivokset, mineraalien-käsittelylaitokset)	Kattavat laitteet, järjestelmät ja palvelut mineraalien käsittelyyn	<b>51 %</b> Metson liikevaihdosta v. 2014
	<b>Kivenmurskaus</b> (louhokset, murskaus-urakoitsijat)	Murskaus- ja seulontalaitteet ja -palvelut	<b>22 %</b> liikevaihdosta
	<b>Öljy ja kaasu</b> (mm. jalostamot, kemian ja petrokemian laitokset)	Virtauksensääätöratkaisut, venttiilisäädöt ja palvelut	<b>13 %</b> liikevaihdosta
	<b>Massa- ja paperiteollisuus ja muut prosessiteollisuuden alat</b>	Venttiilit, älykkäät asennoittimet, pumput ja palvelut Metallien kierrätyslaitteet ja -palvelut	<b>14 %</b> liikevaihdosta

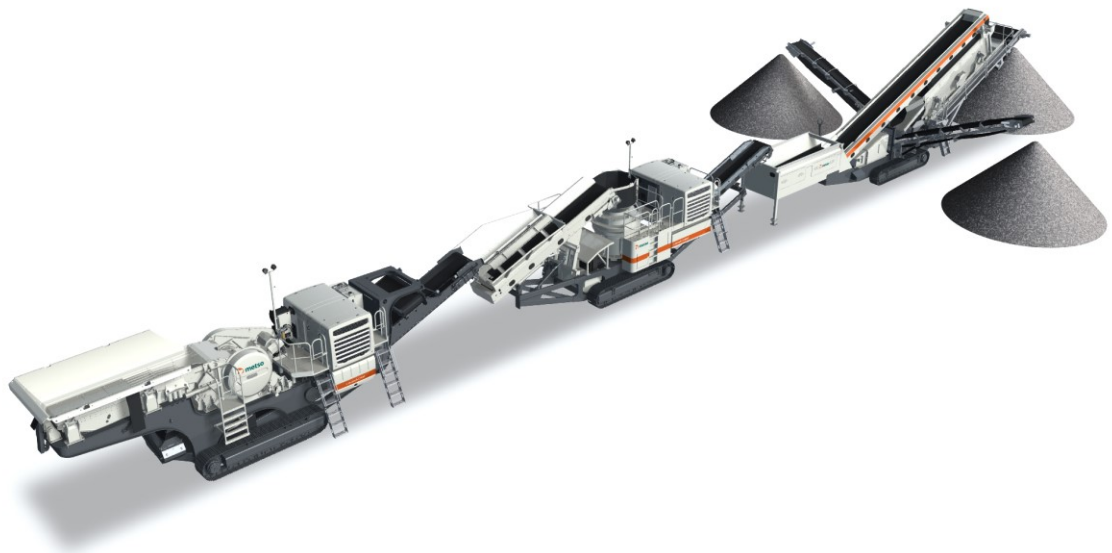
**Kuva 1.** Metson segmentit. (Metso Yleisesitys 2015)

Lokomolla valmistettavien liikuteltavien murskaus- ja seulontalaitteistojen voimansiirtotapana on suurimmassa määrin hydraulikka. Sähkökäytöt lisääntyvät vähitellen ja joidenkin mallien hydraulikkapumppuja käytetään sähkömoottoreilla, jolloin ulkoisen sähkösyöttömahdollisuuden lisäksi koneen dieselmoottori voi olla kytketty generaattoriin sähköverkon ulkopuolella tapahtuvan toiminnan mahdollistamiseksi. Kuluu kuitenkin vielä vuosikausia, ennen kuin hydraulikka voidaan täysin korvata sähköllä.



**Kuva 2.** Lokotrack LT220D, tela-alustainen murskaus- ja seulontalaitos. (Metso Media Bank)

Kuvassa 2 nähdään eräs uusimmista konemalleista, yhdistetty tela-alustainen murskaus- ja seulontalaitos LT220D karamurskaimella. Sillä voidaan tehdä kahden koneen työt ja säästää polttoainekuluissa. Kuvassa 3 on vastaavan kokoisella murskalla varustettu karamurskauslaitos LT200HP toisena koneena.



**Kuva 3.** Murskaus- ja seulontakokonaisuus. (Metso Media Bank)

Kuvan 3 kokonaisuus on tyypillinen murskaus- ja seulontayhdistelmä, joka käsittää vasemmalta lukien Lokotrack LT106 -leukamurskaimen, LT200HP -karamurskaimen ja ST3.8 -seulontalaitoksen. Kuvassa olevissa koneissa kaikki voimansiirto on dieselhydrauliasta.

## 2.3 Työn ongelmakuvaus

Ensimmäisiä dokumentoituja havaintoja hydraulijärjestelmien epäpuhtausasteiden nousussa on tehty kohdeyrityksessä vuonna 2005. Tällöin muutamissa yksittäisissä koneissa on epäpuhtausaste käynyt lähellä hälytysraja-arvoa. Keskimäärin on oltu noin 20 prosenttia alle sallitusta epäpuhtausasteesta. Selvää ja merkittävää nousua epäpuhtausasteissa on havaittu tehtaalla vuoden 2012 aikana, jolloin suuri osa koneista oli puhtaudeltaan hälytysrajalla tai hieman yli. Tämän jälkeen on tehty yksittäisiä toimenpiteitä asian parantamiseksi, kuten puhdistettu hydraulijärjestelmien varastosäiliöt helmikuussa 2014 ja poistettu tulppauspuutteita. Näillä toimenpiteillä ei kuitenkaan ole ollut haluttua vaikutusta, vaan epäpuhtausasteet ovat olleet edelleen korkeita. Ongelmasta aiheutuneet suorat helposti laskettavissa olevat kustannukset ovat olleet sen verran pieniä, että asiaan ei ole kohdistettu investointeja eikä resursseja.

Vuosina 2013 - 2014 puhtausasteet ovat olleet keskimäärin noin 10 prosenttia yli hälytysrajasta ja mahdollisesti tämä syy tämä on aiheuttanut useita HIC-venttiileiden jumiutumisia koekäytön aikana. Muutamia tela-ajon venttiilejä on jumiutunut, mikä aiheuttaa suuren riskin koneen lähellä oleville ihmisille. Myös muita yksittäisempiä ongelmia on melko varmasti johtunut epäpuhtauksista.

Hälytysrajan säännöllisten ylityksien jälkeen vuonna 2014 perustettiin projekti hydraulijärjestelmien puhtauden saattamiseksi hyvälle tasolle. Projekti käynnistyi muutamaa kuukautta ennen tämän diplomityön aloittamista. Projektin ja diplomityön tutkimuskysymys on, mistä merkittävimmät epäpuhtaudet hydraulijärjestelmissä ovat peräisin ja kuinka ne voidaan poistaa.



### 3. HYDRAULIJÄRJESTELMÄN PUHTAUS

Hydraulijärjestelmän puhtaus on sen sisältämien komponenttien ja hydrauliöljyn puhtauksien summa. Hydrauliöljy toimii järjestelmän väliaineena tehon välittäjänä, voitelu-, korroosionesto- ja jäähdytysaineena sekä epäpuhtauksien liuottajana ja kuljettajana. Järjestelmä tuottaa itse epäpuhtauksia kulumisen kautta ja järjestelmään pääsee sisään epäpuhtauksia ympäristöstä. Järjestelmään asennetut suodattimet poistavat näitä epäpuhtauksia ja pitävät epäpuhtaustason sallituissa rajoissa. Epäpuhtaustason määrittämiseen on useita tapoja sekä komponenteille että yleiselle järjestelmäpuhtaudelle, joka määritetään yleisimmin mittaamalla öljyn puhtautta.

Epäpuhtaustason kannalta uuden järjestelmän kokoonpano ja käyttöönotto ovat kriittisiä vaiheita. Uusissa komponenteissa on valmistuksen jäljiltä epäpuhtauksia, kuten metallilastuja, monenlaista pölyä ja muuta likaa. Kuvassa 4 on esimerkki tyypillisestä metallisesta leikkuujätteestä. Kriittisin osa komponenteista puhdistetaan erikseen ja ennen varastointia sekä kuljetusta kaikki komponentit pitäisi sulkea siten, etteivät hydrauliöljyn kanssa kosketuksissa olevat pinnat pääse likaantumaan. Järjestelmän kokoonpanossa suljetut pinnat on avattava ja tässä vaiheessa on suuri mahdollisuus epäpuhtauksien pääsyyn komponenttien sisälle.



**Kuva 4.** Metallisia epäpuhtauksia hydrauliöljyn jäähdyttimen liittännässä.



Kuvassa 4 oleva hydraulioöljyn jäähdytin on pesty komponenttivalmistajan toimesta, mutta pesuprosessissa on ollut häiriö ja todella merkittäviä määriä metallisia epäpuhtauksia on jäänyt komponenttiin. Tällaista silminnähtävää epäpuhtausmäärää ei voida hyväksyä hydraulijärjestelmissä, koska suuret epäpuhtaudet aiheuttavat ongelmia, mikäli pääsevät suodatuksen ohi komponentteihin. Tämä on mahdollista erityisesti uutta järjestelmää ensimmäistä kertaa käynnistettäessä. Lisäksi silminnähtävien epäpuhtauksien joukossa on yleensä todella suuri määrä pieniä hydraulikomponenttien välyksien kokoisia epäpuhtaushiukkasia, jotka ovat erityisen haitallisia järjestelmälle sen kulumisen kannalta. Taulukossa 1 on lueteltu hydraulikomponenteissa yleisiä välyksiä. Niiden kokoiset epäpuhtaushiukkaset aiheuttavat ongelmia ja kulumista. Välyksien kokoiset ja niitä suuremmat hiukkaset voivat aiheuttaa äkillisiä vaurioita tai jopa toimintahäiriöitä takertuessaan kiinni välykseen tai sen reunalle. (Kauranne *et al.* 2008, s. 375)

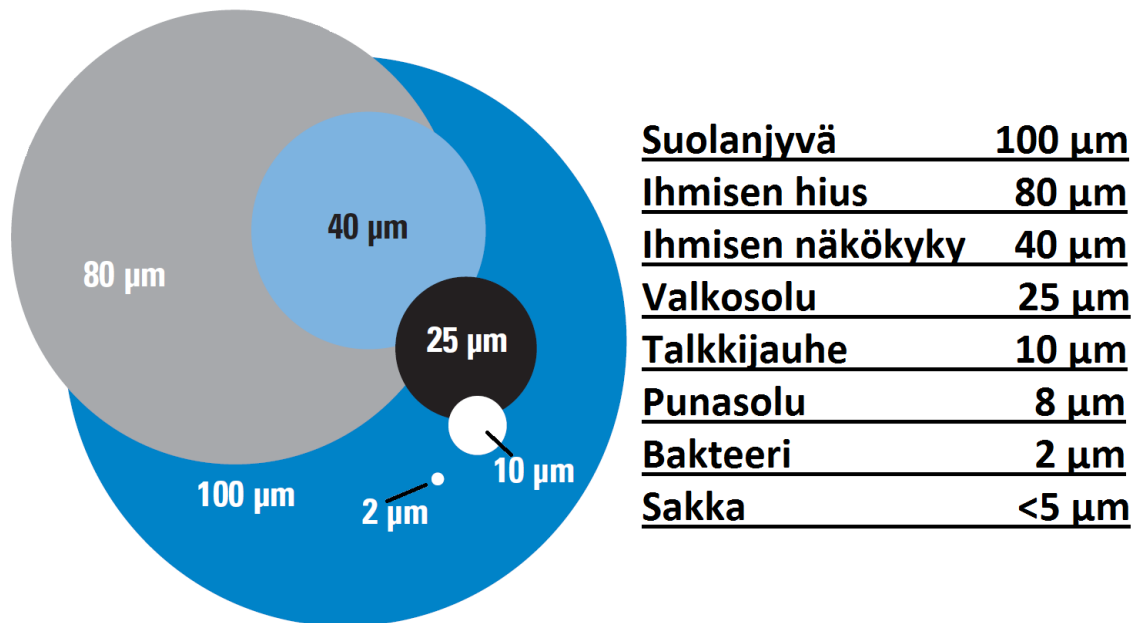
**Taulukko 1.** *Hydraulikomponenttien dynaamisia välyksiä [mukaillen Kauranne et al. 2008, s. 376]*

Komponentti/välys	Välys [μm]
Hammaspyöräpumppu	
-hampaan kärki - kammion seinä	0,5–5
-hammaspyörä - sivulevy	0,5–5
Siipipumppu	
-siiven kärki -kammion seinä	0,5–5
-siipi - sivulevy	5–25
Mäntäpumppu	
-mäntä - sylinterinseinä	5–40
-venttiililevy - sylinteriryhmä	0,5–10
Luistiventtiili	
-luisti - runko	5–25
Servoventtiili	
-luisti - runko	2–8
-suutin - läppä	20–70
-suutin (halkaisija)	100–400
Hydrostaattinen laakeri	1–30

Taulukon arvoista huomataan, että hydrauliiikassa välykset ovat hyvin tiukkoja, koska suurilla paineilla välysten täytyy olla pieniä, jotta vuodot ja häviöt eivät muodostuisi liian suuriksi. Näin ollen hyvin pienet mikrometrien kokoiset epäpuhtaushiukkaset ovat haitallisia korkeapainehydrauliiikassa. Sallittu epäpuhtaustaso riippuu järjestelmän painetasosta ja matalammilla painetasoilla sallitaan hieman suurempia epäpuhtausmääriä. Näin on tietenkin vain silloin, kun myös komponentit on valittu matalammalle paineta-

solle, koska pienempi välyksisiä komponentteja voidaan käyttää myös suurinta käyttöpainetta pienemmillä paineilla.

Muutamien mikrometrien kokoiset välykset ja epäpuhtaushiukkaset ovat hankalia hahmottaa ihmisaistein. Ihmisen näkökyky ulottuu noin 40 mikrometriin. Tätä pienempiä epäpuhtauksia ei näe silmällä, joten aistinvaraisesti ei pysty hydrauliiikan puhtautta arvioimaan kuin erittäin karkealla tasolla. Kuvassa 5 on vertailtu erilaisten hydrauliiikan vällysalueella olevien asioiden kokoa.



**Kuva 5.** Kokoluokkien vertailua (mukaillen lähdettä Donaldson Company 2012, s. 343)

Pumppujen ja luistiventtiilien yleiselle noin 5 µm:n vällysalueelle osuvat bakteerit ja punasolut. Kyse on siis todella pienistä hiukkasista. Yleisesti voidaan sanoa, että kulumisen kannalta hydrauliiikalle vaarallisimman kokoisia epäpuhtaushiukkasia ovat ne, joita ei silmällä näe. Tätä yleistystä tukee myös se, että riittävän pienen painehäviön mahdollistamiseksi järjestelmissä käytettävien suodattimien suodatuskyky ulottuu yleensä 5–20 µm:in kokoluokkiin asti. Ihmisen näkökyvyn rajalla olevat hiukkaset siis suodattuvat tehokkaasti, mutta kulumisen kannalta kriittiset hiukkaset eivät niin hyvin. Myös alle 5 µm:in kokoluokkiin asti suodattavia suodattimia on yleisesti markkinoilla, mutta tällöin suodatuskustannukset alkavat kasvaa, ja suodatus onkin kompromissi suodatuksen kustannuksien ja kulumisesta aiheutuvien kustannuksien välillä. Riippuu järjestelmän kriittisyydestä ja halutusta kestoikästä, kuinka tehokas suodatus valitaan.

Hydrauliöljy voidaan luokitella yhdeksi hydraulijärjestelmän komponentiksi. Vaikka uusi hydrauliöljy on silminnähden puhdasta, ei se yleensä ole ilman toimenpiteitä riittävän puhdasta hydraulijärjestelmässä käytettäväksi. Järjestelmän täyttämiseen käytettävä öljy onkin suodatettava ennen järjestelmään lisäämistä. Suodatuksen tasosta riippuen öljyyn jää edelleen epäpuhtauksia, ja näihin kun lisätään kaikissa järjestelmän kom-

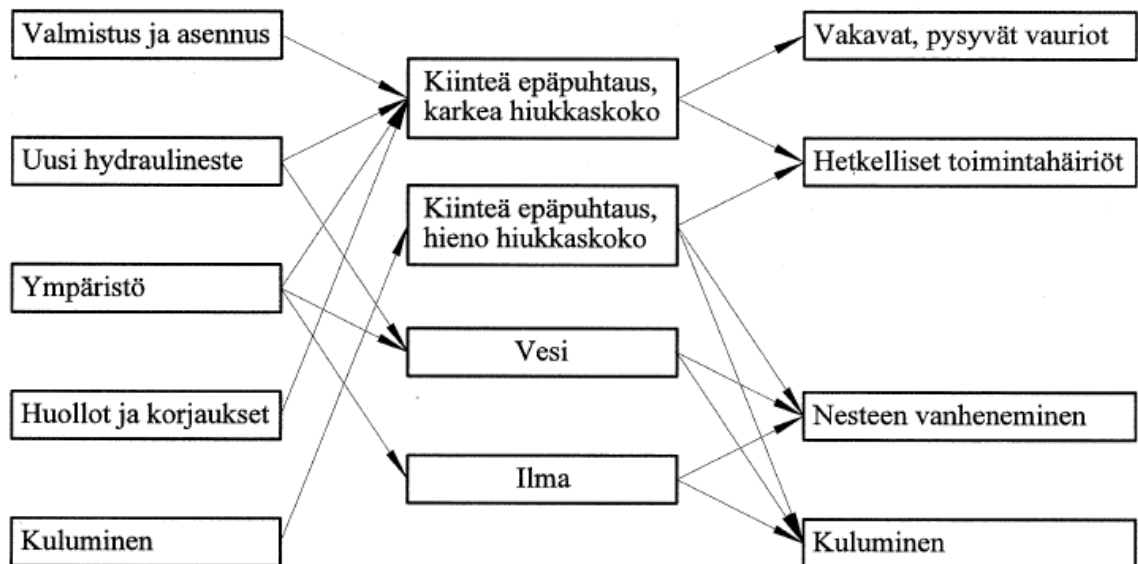
ponenteissa olevat epäpuhtaudet, syntyy näistä kaikista uuden järjestelmän epäpuhtauslähteistä yhdessä merkittävä määrä epäpuhtauksia. Ne kaikki ovat järjestelmässä sitä ensi kertaa käynnistettäessä. Epäpuhtauksien kokonaismäärän ollessa hallinnassa ja järjestelmän suodatuksen riittävällä tasolla, voidaan järjestelmän käynnistys tehdä ilman erityisiä lisätoimenpiteitä, jonka jälkeen suodattimet puhdistavat valmistuksessa järjestelmään jääneet epäpuhtaudet riittävän nopeasti pois. Jos järjestelmässä on liikaa epäpuhtauksia, tai yksittäisiä suuria epäpuhtauskappaleita, voi järjestelmään tulla toimintahäiriöitä heti ensi käynnistytyn jälkeen. Tällaisessa tilanteessa järjestelmän ensikäynnistyksessä voidaan käyttää ylimääräisiä suodattimia tai järjestelmä voidaan huuhdella ennen varsinaista käynnistystä. Valmistuksen apuna käytettävien kemikaalien yhteensopivuus hydrauliliöllyn kanssa on varmistettava, ettei synny epätoivottuja kemiallisia reaktioita, jotka vaikuttavat öljyn ominaisuuksiin ja kestoikään.

### 3.1 Epäpuhtauksien aiheuttamat haitat

Epäpuhtauksien aiheuttamat haitat riippuvat hiukkasten koosta ja kovuudesta. Yleisesti on arvioitu, että noin 70 – 80 % hydraulijärjestelmien toimintahäiriöistä johtuu epäpuhtauksista. (Kauranne *et al.* 2008, s. 374; C.C.Jensen A/S 2016, s. 3) Kiinteiden epäpuhtauksien osuus tästä on 50 – 55 % ja veden ja ilman osuus on 20 – 25 %. (Kauranne *et al.* 2008, s. 374) Kiinteät epäpuhtaudet aiheuttavat haittaa ja erityisesti kulumista, kun niiden kovuus on suurempi kuin komponenttien liikkuvien pintojen kovuus. Myös pintoja pehmeämmät hiukkaset aiheuttavat ongelmia tukkimalla pieniä virtauksia kuten kuristimia ja suuttimia.

Suuret silminnähdyttävät tai komponenttien välyksiä suuremmat epäpuhtaudet aiheuttavat hydraulijärjestelmissä pahimmillaan äkillisiä vaurioita ja toimintahäiriöitä. Pahin tilanne on, jos koneen käyttäjä menettää liikkuvan koneen hallinnan, jolloin voi olla jopa ihmishenkiä vaarassa tai vähintään vakavan loukkaantumisen riski. Tällaisen riskin voi aiheuttaa esimerkiksi venttiiliin tarttuva metallilastu, joka jumittaa venttiilin karan tiettyyn asentoon ja aikaansaa odottamattoman liikkeen. Tällöin komponentti joudutaan joko vaihtamaan heti tai epäpuhtaus saattaa irrota paineen- ja virtauksen suunnanmuutoksen vaikutuksesta. Irtoamisen jälkeen komponenttiin saattaa jäädä pysyvä vaurio. Vaurion vakavuudesta riippuen komponentin käyttöä voidaan jatkaa tai se joudutaan vaihtamaan uuteen.

Komponenttien välyksiä pienemmät ja erityisesti välyksien kokoiset hiukkaset aiheuttavat kulumista pidemmällä aikavälillä. Kulumismekanismeja on useita ja niistä tärkeimpiä ovat abrasiivinen kuluminen, eroosiokuluminen ja pintaväsymismurtuminen. (Kauranne *et al.* 2008, s. 376) Myös öljyyn kuulumattomat nesteet, kaasut ja kemialliset aineet aiheuttavat liian suurina pitoisuuksina ongelmia. Kuvassa 6 on koottuna epäpuhtauslähteitä, -tyyppejä ja epäpuhtauksien aiheuttamia haittoja.

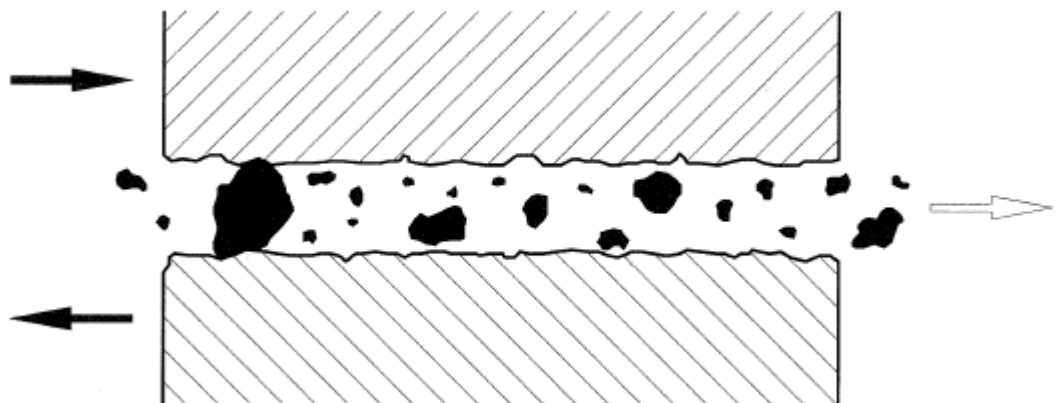


**Kuva 6.** Epäpuhtaudet, niiden lähteet ja haitat. (Kauranne et al. 2008, s. 379)

Kuvasta huomataan, että syy-yhteyksiä on useita. Lisäksi hienoon hiukkaskokoon voisi vetää nuolen muistakin epäpuhtauslähteistä, sillä yleensä kiinteitä hiukkasia on eri lähteissä kaiken kokoisia. Erityisesti niin, että karkeiden hiukkasten joukossa on hienojaakin.

### 3.1.1 Abrasiivinen kuluminen

Abrasiivinen kuluminen aiheutuu liikkuvien pintojen välissä olevista pintoja kovemmista hiukkasista. Noin välyksen kokoinen hiukkanen painautuu kiinni pehmeämpään pintaan ja pintojen liikkeen seurauksena leikkaa materiaalia toisesta pinnasta. Periaate tästä on kuvassa 7. Painetasosta riippuen nämä hiukkaset ovat kooltaan 5–20 µm.

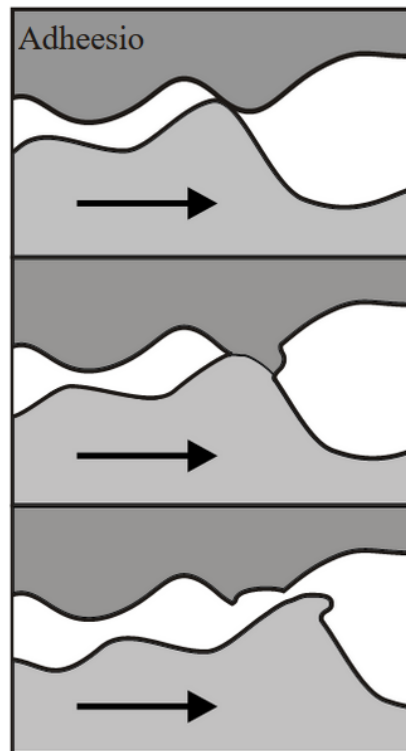


**Kuva 7.** Abrasiivisen kulumisen periaate. [Kauranne et al. 2008, s.377]

Irtileikkaantunut materiaali karkenee kovemmaksi kuin pinnat ja toimii uutena hiomaineena, josta syntyy kulumisen ketjureaktio. (Kauranne et al. 2008, s. 377) Kulumismekanismi on yleinen pyörivissä hydraulikomponenteissa ja niiden liukupinnoissa ja -laakereissa.

### 3.1.2 Adhesiivinen kuluminen

Adhesiivinen kuluminen aiheutuu kahden toisiaan vasten painautuvan pinnan pinnan-  
karheushuippujen välille syntyvien adhesiivisten liitosten repeytyessä irti eri kohdasta  
kuin syntynyt liitos. (Kivioja *et al.* 2010, s. 64–65) Kuvassa 8 nähdään periaate tästä.  
Ensimmäisessä vaiheessa tapahtuu adheesio, jossa pinnankarheushuiput liimaantuvat  
toisiinsa. Toisessa vaiheessa alkaa tapahtua muodonmuutosta liikkeen jatkuessa. Alim-  
massa vaiheessa on juuri tapahtunut irti repeytyminen tummemman materiaalin alueelta.

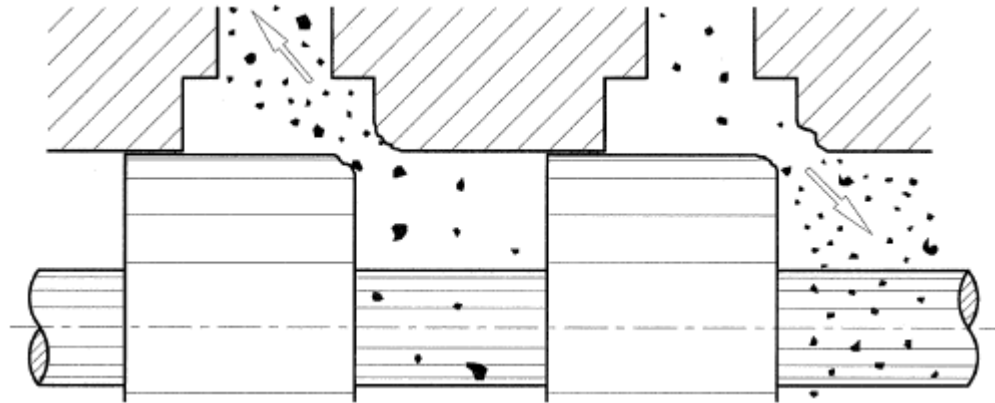


**Kuva 8.** Adhesiivinen kulumistapa. (Terva 2012)

Adhesiivisen kulumisen kulumisnopeus riippuu siitä, mistä kohdasta liitos repeää. Liitoksen repeytyessä alkuperäisestä pintojen rajapinnasta, ei kulumishiukkasia synny lainkaan. Liitoksen revetessä materiaalin puolelta siirtyy materiaalia pinnalta toiselle ja lopulta irtoa myös kulumishiukkasia. Adhesiivista liitosta kutsutaan myös kylmähitsautumiseksi. Siihen vaikuttavat pintojen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet, voitelu ja kuormitus. Kuorman suurenessa pinnankarheuden huippujen alla olevat plastisoituneet alueet laajenevat ja lopulta yhtyvät, jolloin koko pintakerros plastisoituu ja pinnat tahmautuvat toisiinsa. Jos liike edelleen jatkuu, kasvaa kulumisnopeus voimakkaasti ja lämpötila nousee. Liikkeen pysähtyessä tahmautumisen takia, puhutaan kiinnileikkautumisesta. (Kivioja *et al.* 2010, s.104–106)

### 3.1.3 Eroosiokuluminen

Eroosiokuluminen johtuu nesteen mukana virtaavien hiukkasten iskeytymisestä suurella nopeudella komponenttien pintoihin. Iskussa hiukkasen liike-energia siirtyy pintaan ja tämä aiheuttaa pintamateriaalin irtoamista. Mitä suurempi on nesteen virtausnopeus, sitä enemmän hiukkasilla on liike-energiaa ja sitä suurempaa on kuluminen. Eroosiokulumista esiintyykin tämän takia yleisesti venttiileissä. Tällaisesta kulumisesta on esimerkiksi kuvassa 9.

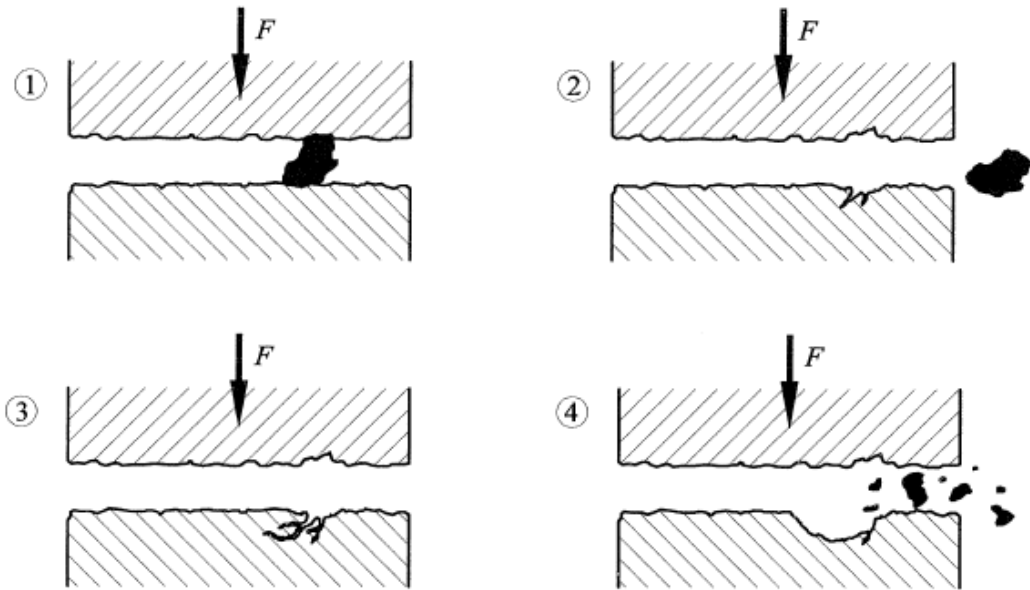


*Kuva 9. Eroosiokulumisen periaate. [Kauranne et al. 2008, s.377]*

Venttiileissä kuluminen kohdistuu eniten ohjausreunoihin karassa ja rungossa. Tästä johtuen venttiilin ohjausominaisuudet heikkenevät ja vuodot kasvavat pikkuhiljaa. Eroosiokulumista aiheuttavat hiukkaset ovat tavallisesti kooltaan alle 5  $\mu\text{m}$ . (Kauranne et al. 2008, s. 377)

### 3.1.4 Pintaväsymismurtuminen

Pintaväsymismurtuma syntyy kahden vierivän ja toisiaan kuormittavan pinnan välissä. Pintojen väliin pääsee kova noin välyksen kokoinen epäpuhtaushiukkanen ja pinnat lähestyvät toisiaan kuormituksen alla voitelukalvon ohentuessa. Tällöin pinnat pääsevät kosketukseen epäpuhtaushiukkasen välityksellä ja voitelukalvon kantama kuormitus siirtyy hiukkasen kantamaksi. Tämä tapahtuu kuvan 10 ensimmäisessä vaiheessa.



**Kuva 10.** Pintaväsymismurtumisen periaate. [Kauranne et al. 2008, s. 378]

Koko kuormituksen siirtyminen hiukkasen kannettavaksi aiheuttaa pinnoissa pintapaineen liiallisen kasvun hiukkasen kohdalla ja pintoihin syntyy jälkiä ja säröjä. Tämä on kuvattu kuvan 10 toisessa vaiheessa. Kolmannessa vaiheessa voitelukalvon välittämä pintojen kuormitus kasvattaa säröjä ja säröjen kasvu lopulta viimeisessä vaiheessa irrottaa pinnoista materiaalia. Pintaväsymismurtumista esiintyy esimerkiksi hammaspyöräpumppujen ja -moottorien hammaspinnoissa sekä vierintälaakeripinnoissa. (Kauranne et al. 2008, s. 377)

### 3.1.5 Nestemäiset- ja kaasumaiset epäpuhtaudet

Nestemäinen epäpuhtaus hydraulijölyissä on yleisimmin vesi. Valmistuksen jäljiltä on teoreettinen mahdollisuus, että komponentteihin jää esimerkiksi leikkuunesteitä. Vahinkojen seurauksena öljysäiliöön voidaan laittaa käytännössä mitä tahansa koneissa käytettäviä nesteitä, kuten jäähdytysnestettä, lasinpesunestettä, pakokaasujen jälkikäsitelystä tai dieselmoottoriöljyä. Jos koneessa on lämmönsiirrin jäähdytysnesteen ja hydraulijölyn välillä, tämän vikaantuessa voi jäähdytysnestettä vuotaa hydraulijölyn sekaan käytön aikana.

Vesi aiheuttaa hydraulikomponentteihin korroosiota ja kulumista. Hydraulijölyn viskositeetti heikkenee ja vesi reagoi kemiallisesti öljyn kanssa. Tämä kemiallinen reagointi huonontaa öljyn voiteluominaisuuksia ja lisää öljyn hapettumista. Vesi voi aiheuttaa emulsion muodostumista ja tästä seuraa suodattavuuden ja suodattimien käyttöiän heikkenemistä. (Bosch Rexroth 2014)

Kaasumaisista epäpuhtauksista järjestelmissä esiintyy yleisimmin ilmaa. Toinen mahdollinen kaasu on rikkoutuvasta paineakusta vuotava tyyppi. Hydraulijölyn ollessa kosketuksissa ilman kanssa liukenee öljyyn muutamia prosentteja ilmaa. Tämä ei ole haital-

lista, toisin kuin vapaat ilmakuplat. Ne lisäävät öljyn kokoonpuristuvuutta, joka lisää järjestelmän epämääräistä käytöstä ja laskee hyötysuhdetta. Vapaa ilma saattaa myös edistää kavitointia, jolloin kulumisen jälleen lisääntyy. Tästä edelleen seuraa vuotojen ja hyötysuhteen laskua. (Kauranne *et al.* 2008, s. 126)

Ilma voi päätyä hydraulineesteeseen vuotavien tiivistimien kautta, huonosti tehdyn ilmauksen seurauksena tai säiliössä liian pinnassa tapahtuvan voimakkaan virtauksen ja vaahtoamisen kautta. Säiliön tulisikin mahdollistaa ilman nouseminen öljyn pinnalle ja muodostuvan vaahdon tulisi hajota mahdollisimman nopeasti. Näihin voidaan käyttää ilmanerottumiskykyä parantavia lisäaineita ja vaahtoutumisenestolisäaineita. (Kauranne *et al.* 2008, s. 126)

### 3.1.6 Kemialliset epäpuhtaudet

Hydrauliöljyyn kemiallisesti sopimattomien aineiden pääsy öljyyn voi aiheuttaa ongelmia öljyn suorituskykyyn tai komponentteihin. Tavanomaisessa koneenrakennuksessa tällaisia kemiallisia epäpuhtauksia voivat olla asennuksessa mahdollisesti käytettävät asennusrasvat ja -pastat. Näiden aineiden yhteensopivuus käytettyyn öljyyn ja sen sisältämiin lisäaineisiin on tarkastettava. (Korhonen 2015) Vahinkojen seurauksena öljyyn lisätyt muut aiemmin mainitut nesteet voivat aiheuttaa myös kemiallisia ongelmia, jos ne liukenevat hydrauliöljyyn.

Öljyn laboratorioanalyyseissä saadaan tutkittua lisäaineiden pitoisuudet. Yleisesti mitatut lisäaineet ovat kalsium, magnesium, boori, sinkki, fosfori, barium ja rikki. Epäpuhtauksiksi lasketaan yleisesti pii, kalium ja natrium. Näiden aineiden pitoisuuksien tulokinnassa on hyvä tietää uuden öljyn sisältämä lähtötaso, johon pystytään tekemään vertailua tai trendiseurantaa.

Pii-pitoisuuden nousu voi liittyä hiekan läsnäoloon ja täten metallien abrasiiviseen kulumiseen. Jos samanaikaista metallien pitoisuuden kasvua ei havaita, on pii ja epäpuhtauksia voinut päätyä näytteeseen näytteenoton yhteydessä, tai se voi olla peräisin siliikonipohjaisista tiivistimistä, silikonipohjaisesta vaahdonestoaineesta, siloksaania sisältävästä polttoainekaasusta tai silikonikumista. (Exxon Mobil 2008) Uudessa öljyssä silikonipohjaisen vaahtoutumisenestoaineen oikea määrä voidaan tarkistaa piipitoisuudesta.

## 3.2 Puhtaustasojen mittaaminen ja standardit

Puhtaustasojen mittaamiseen on kehitetty monenlaisia keinoja. Öljystä otettavia pullo-näytteitä voidaan analysoida laboratoriossa tai kannettavilla laitteilla. Kannettavilla laitteilla voidaan mitata suoraan käynnissä olevasta järjestelmästä, jolloin on kyse online-mittauksesta. Mittalaite voidaan asentaa myös pysyvästi järjestelmään ja tästä käytetään nimitystä inline-mittaus.



Puhtaustasojen ilmoittamiseen on olemassa useita standardeja. Standardin NAS 1638 mukainen ilmoitustapa kertoo hiukkasten lukumäärän viidessä eri kokoluokassa. Puh-  
tausluokkana ilmoitetaan yleensä 5–15 µm kokoisten hiukkasten luokkakoodi. Tämä voi  
johtaa harhaan, sillä näyte voi olla tätä isompien hiukkasten osalta todella puhdas tai  
todella likainen. Tämän takia pelkkää yksittäistä puhtaustuokkakoodia ei ole järkevää  
käyttää. ISO 4406 standardin puhtaustuokitus käyttää kolmelle kokoluokalle omia puh-  
taustuokkakoodia, joiden tulkinnassa on myös syytä olla tarkkana.

### 3.2.1 Mittaustavat

Hydrauliöljyn puhtautta voidaan mitata eri tavoin. Perinteisin menetelmä on ottaa mitat-  
tavasta kohteesta näyteöljyä pulloon. Näyte analysoidaan laboratorio-olosuhteissa. Tätä  
kutsutaan pulloanalyysiksi sekä myös offline -analyysiksi. Offline -nimitys tulee siitä,  
että analysointi tapahtuu irrallaan järjestelmästä. Mittaustavan etuina ovat käyttäjälle  
edulliset kustannukset, kun mittauskertoja on vähän. Laboratorio-olosuhteissa tehtävä  
analysointi on tarkka ja tietoon saadaan öljyn kaikki fyysiset ja kemialliset ominaisuu-  
det. Huonoina puolina ovat näytteenoton mahdollinen hankaluus, sotkuisuus ja näyte-  
pullon ollessa avoinna mahdollinen näytteen saastuminen. Tuloksen saamisessa kestää  
myös aikaa näytteen laboratorioon kuljettamisesta ja siellä mahdollisesti olevasta  
jonosta riippuen. Joillakin siirrettävillä hiukkaslaskureilla voidaan analysoida myös pul-  
lonäyte. Tällöin pitää myös sekoittaa näyte kerrostumien poistamiseksi ja poistaa synty-  
neet ilmakuplat alipaineistuksella tai ultraäänellä (ISO 11500:2008 s. 9). Ei-laboratorio-  
olosuhteissa onkin parempi käyttää siirrettävää hiukkaslaskuria mittaamalla suoraan  
järjestelmästä (Kurenniemi 2014, s. 45 – 46). Offline -analyysi soveltuu tilanteeseen,  
jossa halutaan tietää öljystä mahdollisimman paljon niin puhtauden kuin kemiallisten  
ominaisuuksien ja kestoajan suhteen.

Siirrettävien hiukkaslaskureiden yleistyttyä on tullut mahdolliseksi mitata öljyn puhtaut-  
ta paikan päällä. Hiukkaslaskurit kytketään paineiseen järjestelmään esimerkiksi pai-  
nemittausliittimellä ja öljy virtaa laskurin läpi joko takaisin järjestelmään tai jäteastiaan.  
Tätä mittaustapaa kutsutaan termillä online -mittaus, koska se tapahtuu järjestelmän  
yhteydessä. Öljyn puhtaustuokka nähdään lähes reaaliajassa laitteen näytöltä ja voidaan  
tallentaa sähköisesti tarkempaa analysointia varten. Tämä on selkeä etu, koska öljyn  
puhtautta voidaan mitata helposti useista eri järjestelmän osista sekä käytettäessä järjes-  
telmän eri toimintoja. Myöskään ulkoiset epäpuhtaudet eivät pääse likaamaan näytettä,  
kun näyte virtaa suljettuja letkuja pitkin. Letkut täytyy tietenkin muistaa huuhdella näy-  
teöljyllä ennen varsinaista mittausta. Hiukkaslaskureissa onkin yleisesti sisäänrakennet-  
tu huuhtelutoiminto ennen mittauksen aloittamista. Monissa hiukkaslaskureissa on myös  
oma pumppu, joka vakioi virtauksen eri paineista mitattaessa sekä mahdollistaa myös  
pullonäytteiden analysoinnin. Huonoina puolina online -analyysissä on laboratorio-  
analyysiä suppeammat tulokset. Yleisimmät hiukkaslaskurit ilmoittavat ainoastaan öljyn  
puhtaustuokat ja hiukkasmäärät eri kokoluokissa. Online -hiukkaslaskenta soveltuu ti-

lanteeseen, jossa halutaan nopeasti selvittää öljyn hiukkaspuhtaus ja mahdollisesti sen vaihtelut järjestelmän eri toimintojen aikana.

Hiukkasantureiden kehittyessä ja tietoisuuden lisääntyessä on alettu käyttää myös suoraan järjestelmään asennettuja hiukkaslaskureita. Tätä tapaa kutsutaan termillä inline -mittaus, koska mittaus on osa kohdejärjestelmää. Sen etuina ovat käytön helppous ja integrointi koneen omaan käyttöjärjestelmään. Jatkuva mittaus mahdollistaa parhaan mahdollisen seurannan erityisesti yllättäville epäpuhtauslähteille. Inline -mittaus soveltuu kriittisille järjestelmille, joissa puhtaustasojen muutokset halutaan tietää välittömästi ja niihin voidaan reagoida.

### 3.2.2 ISO4406:2017

ISO4406 standardin uusin versio vuodelta 2017 käsittelee nestenäytteiden hiukkasmäärien ilmoittamista kolmella puhtausluokalla. Tarkoituksena on yksinkertaistaa hiukkas määrän ja –jakauman ilmoittamista ja vertailua. Ensimmäinen luokka kertoo  $\geq 4 \mu\text{m(c)}$  kokoisten hiukkasten lukumäärän, toinen luokka  $\geq 6 \mu\text{m(c)}$  ja kolmas luokka  $\geq 14 \mu\text{m(c)}$  kokoisten hiukkasten lukumäärän. Lukumäärät ovat siis kumulatiivisia eli esimerkiksi ensimmäiseen puhtausluokkaan kuuluu kaikki näytteessä olleet yli  $4 \mu\text{m}$  hiukkaset. Taulukossa 2 on esitetty standardin mukaiset hiukkasten kappalemäärät yhdessä millilitrassa nestettä eri luokkanumeroille.

**Taulukko 2.** ISO4406 standardin puhtausluokkia vastaavat hiukkasmäärät. [mukaillen ISO4406:2017, s. 2-3]

Hiukkasten kappalemäärä millilitrassa		Luokkanumero
Yli	Asti	
2 500 000		>28
1 300 000	2 500 000	28
640 000	1 300 000	27
320 000	640 000	26
160 000	320 000	25
80 000	160 000	24
40 000	80 000	23
20 000	40 000	22
10 000	20 000	21
5 000	10 000	20
2 500	5 000	19
1 300	2 500	18
640	1 300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13

20	40	12
10	20	11
5	10	10
2,5	5	9
1,3	2,5	8
0,64	1,3	7
0,32	0,64	6
0,16	0,32	5
0,08	0,16	4
0,04	0,08	3
0,02	0,04	2
0,01	0,02	1
0,00	0,01	0

Siirryttäessä puhtausluokan ylärajalta seuraavan luokan ylärajalle, kasvaa hiukkasten lukumäärä kaksinkertaiseksi. Toisaalta yhden hiukkasen lisääntyminen muuttaa luokkaa yhtä paljon, jos lukumäärä on juuri rajalla. Tarkemmissa tarkasteluissa onkin syytä tutkia pelkkien puhtausluokkamuutosten lisäksi hiukkasmääriä, ettei tule tulkintoja liian suurista epäpuhtauksien lisääntymisistä tai vähentymisistä.

Hiukkaskokoluokan lopussa oleva (c) -merkintä tarkoittaa, että kyseisen koon määrittämiseen on käytetty ISO11171 -standardin mukaisesti kalibroitua automaattista hiukkaslaskinta. Hiukkasten pinta-ala vastaa kyseisen halkaisijaista ympyrän pinta-alaa. Vanhassa ISO4406:1987 -standardiversiossa ja nykyäänkin mikroskooppilaskennassa koko tarkoittaa hiukkasen suurinta pituusmittaa. (ISO4406:2017, s. 1)

### 3.2.3 ASTM D7647-10

ASTM D7647-10 on menetelmästandardi hydraul- ja voiteluöljynäytteiden liuottamiseen, jotta mittaustuloksista voidaan poistaa automaattista hiukkaslaskentaa häiritsevät pehmeät hiukkaset ja vesi, jotka eivät ole kuluttaviksi epäpuhtauksiksi laskettavia. Vaikka standardin nimessäkin mainitaan ”soft particle”, eli pehmeä hiukkanen, eivät nämä välttämättä ole hiukkasmaisessa muodossa, vaan mahdollisia olomuotoja ovat lisäksi neste tai puolikiinteä eli geeli. Hiukkaslaskurin laser -anturi kuitenkin havaitsee näitä lisäaineita samoin kuin epäpuhtaushiukkasia, kuten myös erottunutta vettä, koska eri nesteiden rajapinnoista syntyy varjoja anturin detektorille. (ASTM D7647-10 2018, s. 2) Öljyyn tarkoituksella lisättyjen lisäaineiden lukeminen epäpuhtauksiksi ei ole tietenkään tarkoituksenmukaista.

Standardissa mainitaan öljyyn liukenemattomien lisäaineiden ja lisäaineiden johdannaisen aiheuttavan valon sirontaa automaattisissa hiukkaslaskureissa joka aiheuttaa virheellisen suuria mittaustuloksia. Liuotus auttaa myös ehkäisemään automaattisen

hiukkaslaskennan epätarkkuuksia korkeaviskositeettisilla öljyillä. (ASTM D7647-10 2018, s. 2)

Standardi sisältää menetelmät laimentamiseen tilavuuden ja massan perusteella. Menetelmän mukaisesti näyte laimennetaan liuottimella, sekoitetaan, poistetaan ilma ja suoritetaan hiukkaslaskenta. Tämän jälkeen tehdään matemaattinen laskenta jokaiselle halutulle hiukkaskokoluokalle, jolla laimennuksen vaikutus poistetaan mittaustuloksista ja saadaan vertailukelpoinen hiukkaspuhtaus. Laskenta on kuvattu kaavoilla 1 - 3, jotka löytyvät standardista. Hiukkasten kappalemäärät alkuperäisessä näytteessä saadaan kertomalla laimennuskertoimella liuotetun näytteen tulokset, josta on vähennetty liuottimen hiukkasten pieni vaikutus. Laimennuskerroin (dilution ratio) näytteen (sample) suhteen  $D_{r,s}$  lasketaan

$$D_{r,s} = \frac{\frac{M_s}{P_s} + \frac{M_d}{P_d}}{\frac{M_s}{P_s}}, \quad (1)$$

jossa  $M_s$  on näytteen massa grammoina,  $M_d$  on liuottimen (diluent) massa grammoina,  $P_s$  on näytteen tiheys ( $g/cm^3$ ) ja  $P_d$  on liuottimen tiheys ( $g/cm^3$ ).

Laimennuskerroin liuottimen suhteen  $D_{r,d}$  lasketaan vastaavilla merkinnöillä

$$D_{r,d} = \frac{\frac{M_s}{P_s} + \frac{M_d}{P_d}}{\frac{M_d}{P_d}}. \quad (2)$$

Kumulatiiviset hiukkasten kappalemäärät  $C_{s,n}$  alkuperäisessä näytteessä jokaiselle kokoluokalle  $n$  saadaan käyttämällä kaavaa

$$C_{s,n} \geq n \mu m = D_{r,s} \left( C_{t,n} - \frac{C_d}{D_{r,d}} \right), \quad (3)$$

jossa edellisten merkintöjen lisäksi  $C_{t,n}$  on liuotetun näytteen hiukkasmäärä kyseisessä kokoluokassa ja  $C_d$  on hiukkasten lukumäärä alkuperäisessä liuottimessa. (ASTM D7647-10 2018, s. 6 - 7)

### 3.3 Uuden öljyn puhtaus

Uusi hydraulioöljy ei yleensä ole riittävän puhdasta käytettäväksi hydraulijärjestelmissä. Öljy on vähintäänkin tankattava koneeseen järjestelmän oman paluusuodattimen läpi. Öljyn puhtausluokasta ja järjestelmän vaatimuksista riippuen tämä kertalapäisy ei aina riitä, vaan öljyä on suodatettava ennen käyttöä. Öljyvalmistajille uuden öljyn puhtausta-

so on kustannuskysymys, koska heillä prosessien läpi menevät öljymäärät ja virtausnopeudet ovat erittäin suuria ja hyvän suodatuksen järjestäminen on haaste.

Tyypillinen uusi suodattamaton öljy on ISO4406 puhtausluokituksestaan 19/17/14. Tällainen öljy soveltuu suoraan käytettäväksi matalapainejärjestelmissä. Tavallisissa hydraulijärjestelmissä olisi syytä pitää öljy puhtausluokassa 17/15/12 tai puhtaampana. (C.C.Jensen A/S 2016, s. 10) Taulukon 3 mukaan kaikkiin öljyjärjestelmiin soveltuva erittäin puhdas öljy on luokituksestaan 14/12/10 tai puhtaampaa.

**Taulukko 3.** Eritasoiisiin järjestelmiin soveltuvan öljyn puhtausluokka. [C.C.Jensen A/S 2016, s. 10]

ISO koodi	Kuvaus	Sovelluskohde	*
ISO 14/12/10	Erittäin puhdas öljy	Kaikki öljyjärjestelmät	8,5 kg
ISO 16/14/11	Puhdas öljy	Servo & korkeapainehydrauliikka	17 kg
ISO 17/15/12	Hieman saastunut öljy	Vakio hydraulijärjestelmät	34 kg
ISO 19/17/14	Uusi öljy	Alhaisesta matalapaineisiin järjestelmiin	140 kg
ISO 22/20/17	Erittäin saastunut öljy	Ei sovellu öljyjärjestelmiin	>589 kg

Taulukon 3 viimeinen \*-sarake kertoo kuinka monta kiloa kiinteitä hiukkasia vuoden aikana ohittaa komponentin vastaavan puhtausluokan öljyn virratessa sen läpi. On helppo todeta, että saastuneen öljyn käyttäminen hydraulijärjestelmissä on suuri riski ja aiheuttaa suurta kulumista komponenteissa.

### 3.4 Komponenttipuhtaus

Komponenttipuhtaus on yhtä kriittinen tekijä kuin uuden öljyn puhtaus. Uusi öljykin voidaan luokitella yhdeksi järjestelmän komponentiksi, mutta yleensä ajatellaan kiinteitä komponentteja. Uusissa komponenteissa, oli komponentti sitten öljy, pumppu, moottori tai venttiili, voi olla valmistuksen jäljiltä hyvinkin suuria epäpuhtauksia, kuten metallilastuja tai hiontapölyä. Kuljetuksessa ja varastoinnissa huonosti suljettuun ja pakattuun komponenttiin pääsee pölyä ympäristöstä ja lämpötilan vaihdellessa komponenttiin voi kondensoitua vettä. Ulkotiloissa tapahtuvien kuljetuksien aikana voi myös sadevesi päästä komponenttiin. Suuriakaan komponentteja ei saisi varastoida ulkona ilman suojaa, tai ainakin tällöin on varmistuttava riittävästä korroosio- ja vesisuojauksesta.

Komponenttipuhtauden määrittämiseksi kiinteistä komponenteista on olemassa useita tapoja ja standardeja. Tässä työssä ei käsitelty varsinaisesti muuta komponenttipuhtautta kuin öljyn puhtautta.

### 3.5 Järjestelmäpuhtauteen vaikuttavat asiat

Järjestelmäpuhtaus on järjestelmän komponenttipuhtauksien summa. Kaikki komponenttien epäpuhtaudet pääsevät sekoittumaan valmiissa järjestelmässä. Koska hydraulijärjestelmät

järjestelmissä öljy liuottaa kaikki epäpuhtaudet virratessaan, voidaan järjestelmäpuhtaus määrittää mittaamalla öljyn puhtautta.

Järjestelmäpuhtauteen voidaan vaikuttaa järjestelmän koontavaiheessa käyttämällä puhdaita komponentteja sekä asennusympäristöä. Kun järjestelmä on suljettu, puhdistetaan sitä suodattimilla. Suodattimia voidaan käyttää useissa paikoissa järjestelmää. Yleisesti on käytössä paine- ja paluusuodattimia, jotka soveltuvat järjestelmän täydelle virtaukselle ja ovat nykyään tyypiltään syväsuodattimia. Esimerkiksi pumppujen imulinjoihin ja muihin järjestelmän kohtiin joissa tarvitaan erityisen pientä painehäviötä, voidaan käyttää pintasuodattimia. Pintasuodatuksessa suodatuskerros on ohut ja siinä on tasakokoisia reikiä, eivätkä epäpuhtaudet uppoudu suodatinmateriaaliin.

Sivukiertosuodattimet on suunniteltu pienelle virtaukselle ja ne pystyvät tarkempaan suodatuksen syväsuodatusperiaatteella ja huomattavan paksulla suodatinmateriaalilla. Syväsuodatuksessa suodatuskerros sisältää erikokoisia reikiä ja epäpuhtaudet voivat uppoutua syvälle suodatusmateriaaliin. Syväsuodattimen epäpuhtauskapasiteetti on täten suurempi kuin pintasuodattimen ja sen tukkeutuminen tapahtuu hitaammin.

Tutkimuksien mukaan jo välilyksen kolmasosan kokoiset hiukkaset saattavat aiheuttaa tukoksen välilyksessä. Tämän takia järjestelmän suodattimien absoluuttinen suodatusaste tulisi valita järjestelmän pienimmän välilyksen kolmasosan kokoiseksi tai pienemmäksi. (Bosch Rexroth 2014)

### **3.6 Puhtauden parantamiskeinot tuotannossa**

Hydraulijärjestelmien puhtautta voidaan parantaa tuotannossa monin keinoin. Eri keinojen toteuttamisen vaikeustaso riippuu paljon lähtötilanteesta. Jos puhtausaste jollain osa-alueella on jo hyvällä tasolla, tästä edelleen parantaminen voi olla vaikeaa. Jos taas jollakin osa-alueella on todella merkittävästi parannettavaa, voidaan suuret parannukset saada aikaan yksinkertaisillakin toimenpiteillä. Helpoimpia keinoja puhtauden parantamiseen tuotannossa ovat esimerkiksi komponenttien suojaamisen parantaminen ja asennushenkilökunnan tietotaidon kehittäminen koulutuksilla. Joidenkin komponenttien, esimerkiksi teräsrakenteisten säiliöiden, kohdalla komponenttipuhtauden merkittävä parantaminen saattaa olla myös helppoa, jos lähtökohtana on paljon epäpuhtauksia sisältävä rakenne. Kaikilta komponenttitoimittajilta voidaan vaatia toimittamaan komponentit tiettyyn puhtaustasoon puhdistettuina.

### **3.7 Epäpuhtauksien vaikutus turvallisuuteen**

Hydraulisten koneiden kanssa työskennellessä on ihmisten turvallisuus otettava aina huomioon. Murskainlaitoksien prosessia ohjataan koneen sivulla olevista ohjaimista ja ajaminen tapahtuu joko langallisella tai langattomalla kauko-ohjaimella. Tela-ajon hydrauliventtiilit ovat sähköisesti ohjattuja proportionaaliventtiilejä, jotka eivät siedä suuria

määriä epäpuhtauksia. Turvallisuuden takia on siis tärkeää, että hydrauliiikan puhtaus säilyy riittävän hyvänä kaikissa tilanteissa, jottei ole riskiä ajoventtiileiden jumiintumiselle ja massaltaan kymmenien tuhansien kilogrammojen koneen hallitsemattomalle liikkumiselle.

Hydrauliikalla ylös nostetut taakat ovat myös riskejä, jotka täytyy huomioida. Yleisin tapa ovat letkurikkoventtiilit. Letkurikon tapahtuessa venttiilin täytyisi sulkea öljyn virtaus kokonaan. Tässä tilanteessa merkittävät epäpuhtaudet voivat aiheuttaa venttiilin sulkuelimen väliin jäädessään vuodon, jolloin taakka saattaa laskea vaikka ei pitäisi. Laskunopeus saattaa myös olla hyvin hidas, jolloin korjaustöihin keskittyttäessä on vaara jäädä salakavalasti puristuksiin. Tämänkin takia työturvallisuusohje hydrauliiikan varassa olevien taakkojen tukemiseksi on erittäin tärkeä.

Hydrauliikan epäpuhtauksista johtuvat ylimääräiset huoltotoimet ovat riski ympäristölle. Äkillisissä vioissa myös korjaustoimenpiteitä saatetaan aloittaa nopeasti, ja tällöin saattaa öljyä joutua maahan, jos tarpeellisia valuma-astioita ei ehditä hankkia paikalle. Letkujen rikkoontuessa öljyä voi päästä maaperään ja lisäksi letkurikkoventtiilin jumiuntuessa auki voi sylintereistä valua entistä enemmän öljyä ympäristöön. Suurien sylinterien ollessa kyseessä voivat määrät olla merkittäviä.

## **4. NYKYTILANNE MURSKAIMEN HYDRAULI-JÄRJESTELMÄN PUHTAUDESSA**

Lokotrack-murskauslaitosten LS-hydraulijärjestelmät vaativat kohtalaisen puhdasta öljyä toimiakseen virheettömästi. Komponenttivalmistajien suositusten perusteella on asetettu puhtaustaso, jonka alapuolella epäpuhtausmäärien täytyy pysyä. Tuotannossa on lisäksi oma hälytysraja, jonka ylittyessä aletaan toimenpiteisiin, jottei päädytä asetetulle suurimmalle sallitulle puhtaustasolle.

### **4.1 Järjestelmäkuvaus**

Lokotrack-murskaimien hydraulijärjestelmien rakenteet vaihtelevat jonkin verran eri mallien välillä, mutta pääpiirteet ovat hyvin samoja. Erityisesti suodatusjärjestelmä koostuu aina samoista peruskomponenteista. Suodattimet on mitoitettu suurimpien mallien mukaisesti ja myös painesuodattimien kappalemäärä vaihtelee tarpeen mukaisesti.

Hydrauliöljysäiliö on teräsrakenteinen, varustettu väliseinällä ja sisäpuolelta pinnoitettu. Hydraulipumppujen imuyhteessä on isokokoinen sulkuventtiili, jonka jälkeen yhde ja kaantuu useamman pumpun tarvitsemiin imuletkuihin. Pumppujen imupuolella ei ole suodatusta. Hydraulipumppuina käytetään säätötilavuuksisia LS-aksiaalimäntäpumppuja ja joissakin malleissa sekä lisävarusteiden yhteydessä kiinteätilavuuksisia hammaspyöräpumppuja. Pumppujen jälkeen on painesuodattimet ja koneen pääventtiililohko. Lohko sisältää useita sähköisesti ohjattuja proportionaali- sekä on-off-venttiilejä. Lohkolta lähtevät letku- ja putkilinjat toimilaitteille, joita ovat eri kokoiset kiinteät hammaspyörämoottorit sekä hydraulisylinterit. Paluulinjassa on hydrauliöljyn jäähdytin sekä paluusuodatin, joka on varustettu magneetilla. Lisäksi joissakin malleissa on suljetun piirin hydrostaattinen voimansiirto murskaimen käyttämiseen, jonka huoltopiirissä on oma suodatin.

### **4.2 Asetettu puhtaustasovaatimus**

Metson asettama epäpuhtauksien sallittu enimmäismäärä perustuu komponenttivalmistajien suosituksiin. Näistä on valittava pienimmän epäpuhtausmäärän sallivan komponentin mukainen suositus. Komponenttien kestoikää voitaisiin parantaa sallimalla tätäkin pienempi epäpuhtausmäärä, mutta tällöin puhdistus- ja suodatuskustannukset nousevat. Metson murskaintuotteissa tiukoilla puhtausvaatimuksilla olevia komponentteja on vain pieni osa järjestelmästä, joten muut komponentit ovat näillä vaatimuksilla



jo valmiiksi hyvällä kestoikäalueella. Lisäksi käytännössä on havaittu, että kulumisesta johtuvia hydraulikan kestoikäongelmia on hyvin vähän.

Eri käyttötilanteisiin ei ole asetettu eri puhtaustasovaatimuksia. Näin ollen tehtaalta lähtevä ja kentällä käytössä kone ovat vaatimuksien täyttymisen kannalta erilaisessa tilanteessa. Koska murskaimet joutuvat kentällä ajoittain ankariin kivipölyolosuhteisiin, syntyy käytön aikanakin ajoittain melko suuria epäpuhtausmääriä, aivan kuin tehtaalla ensimmäisiä käynnistyksiä tehtäessäkin.

Koneiden häiriöttömän toimittamisen takaamiseksi tehtaan koekäytössä on määritelty hälytysraja, jonka ylittyessä puhtautta ja sen kehityssuuntaa seurataan aktiivisesti, ettei tultaisi tilanteeseen, jossa puhtaustason ylittymisen takia konetta joudutaan huuhtomaan ja suodattamaan ylimääräisiä kertoja. Konetta ei voida toimittaa asiakkaalle, jos puhtausarvo ei ole sallitun epäpuhtausmäärän alapuolella. Tästä seuraisi mahdollisissa komponenttien rikkoontumistapauksissa komponenttitoimittajien takuiden raukeaminen ja huomattavia ylimääräisiä kustannuksia tehtaalle.

### **4.3 Saavutettu puhtaustaso**

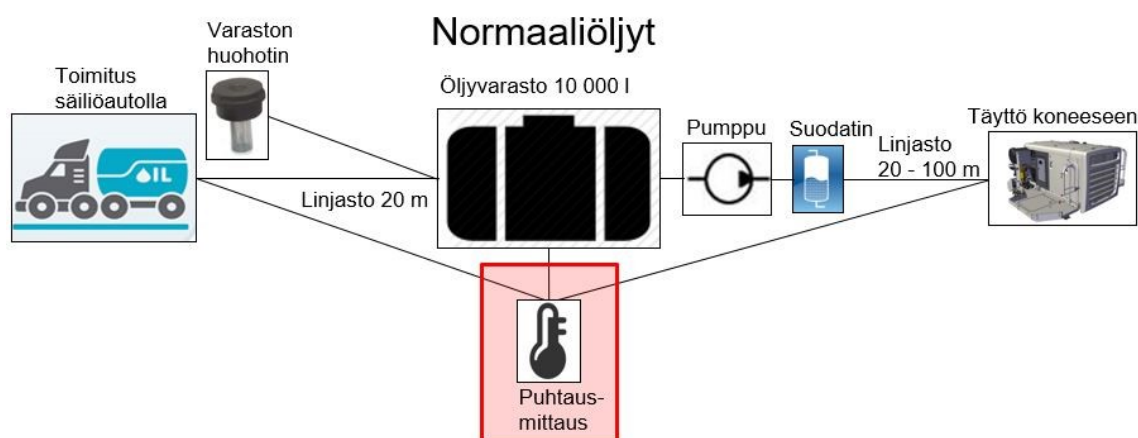
Projektia aloitettaessa kerättiin saatavilla oleva tieto puhtaustasojen kehittymisestä tehtaalla. Nouseva trendi on ollut puhtautta mittaavien henkilöiden tiedossa, mutta tarkkoja tasoja ja aikamääreitä ei ollut dokumentoitu kootusti. Useiden henkilöiden, sähköpostiarkistojen ja koekäyttöjärjestelmän tietoja yhdistämällä saatiin kohtalainen kuva muodostettua puhtauden kehittymisestä.

Ennen vuotta 2012 hydraulioöljyn puhtaus tuotannossa on ollut keskimäärin hyvällä tasolla, noin 20 prosenttia alle sallitusta epäpuhtaustasosta. Kattavat tiedot ovat arkistoituna ainoastaan koekäytössä suoritetuista mittauksista. Tämän lisäksi on muutamia mittaustuloksia varastosäiliöiden puhtaudesta. Vuoden 2012 aikana mittaustulokset nousivat hälytysrajalle. Tällöinkään ei ole suoritettu järjestelmällistä dokumentoitua koko tuotantoprosessin puhtausseurantaa. Vuosina 2013–2014 puhtaustasot ovat olleet keskimäärin noin 10 prosenttia yli hälytysrajasta.

### **4.4 Tuotannon eri vaiheet**

Koko tuotantoprosessin kattava mittaustyö aloitettiin puhtausprojektin alussa. Resurssien puitteissa mittauksia suoritettiin tuotannon eri vaiheissa. Päätoimisen projektityöntekijän toimesta mitattiin tai koordinoitiin puhtausmittaukset kaikista niistä vaiheista, joista se oli järkevää ja mahdollista. Näihin kuuluivat öljyn toimitus tehtaalle säiliöautolla, varastointi, käyttöpisteet, moottorimoduulin koekäyttö, viimeinen öljyn lisäys koneeseen sekä loppukoekäyttö. Öljyn lisäys on suhteessa alkutäyttöön hyvin pieni ja jätettiin resurssien kohdentamisen myötä vähemmälle huomiolle.

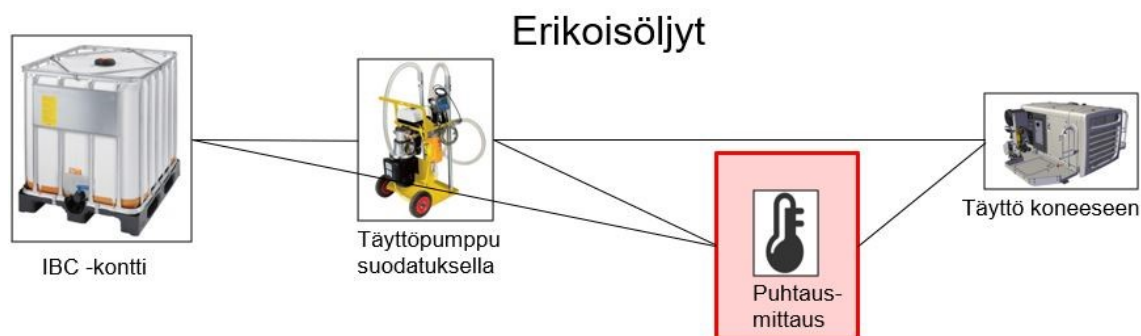
Säiliöautolla bulkkimateriaalina toimitettavan öljyn kierto tehtaalla alkaa varastosäiliöiden täyttöpisteeltä, josta säiliöauto pumpppaa öljyn putkea pitkin varastosäiliöihin kuvan 11 mukaisesti. Säiliöautossa on suodatus, mutta tämän jälkeen ei ole suodattimia ennen varastosäiliöitä. Suuren pumpppaustehon takia varastosäiliöitä täytettäessä niistä poistuu suuri tilavuusvirta ilmaa, joka johdetaan täyttölinjan kokoisella putkella ulos. Putken päässä ei ollut kuin sadesuoja. Tämä saattaa olla hyvinkin yleistä vanhoilla tehtailla, mutta ei aiheuttane suurempia ongelmia, koska varastoon sisäänpäin ilman virtaus on huomattavasti maltillisempaa. Asia korjattiin heti asentamalla suodatin huohotinputken päähän. Puhtausmittauksia tehtiin säiliöauton purkuletkusta, varastosta ja linjaston päästä käyttöpisteiltä otetuista näytteistä.



**Kuva 11.** Varastoöljyn kiertoprosessi.

Öljyvarastossa pneumaattinen pumpppu imee öljyn varastosäiliöistä ja pumpppaa sen suodattimen läpi tehtaan jakolinjastoon. Imu- ja jakolinjat ovat pääasiassa teräsputkia lyhyitä liitosletkuja lukuun ottamatta. Lyhyimmät jakolinjat ovat muutaman kymmenen metrin mittaisia, mutta tehtaan kauimmaiselle öljypisteelle linjaan kertyy mittaa lähes sata metriä. Öljyn käyttöpisteillä on letkukela ja letkun päässä digitaalinen aseteltava tilavuusmittapistooli.

Öljyvarastossa on vain yhtä öljylaatua. Muut öljyalaadut toimitetaan pääasiassa 1000 litran konteissa ja osittain 200 litran tynnyreissä. Niistä tankkaus tapahtuu kuvan 12 mukaisesti suodattimella varustetulla sähkökäyttöisellä täyttöpumpulla. Erikoisöljyistä tehtiin puhtausmittauksia suoraan varastoastioista, täyttöpumpun ulostulosta ja joitakin kertoja koneen säiliöstä tankkauksen jälkeen otetuista näytteistä.



**Kuva 12.** Kontissa varastoitavien erikoisöljyjen kiertoprosessi.

Kuvien 11 ja 12 oikeassa laidassa näkyvän moottorimoduulikokoonpanon ollessa lähes valmis, tankataan siihen muiden nesteiden ohella hydraulioöljyt hydraulioöljysäiliöön. Öljypistooli asetetaan säiliön kannessa olevaan tulpattuun kierreyhteeseen, ja tankkaus käynnistetään. Tässä vaiheessa lisätään suurin osa koneeseen tulevasta öljystä, joka on yleisimmissä konemalleissa yli 500 litraa. Kokoonpanon valmistuttua moduuli siirtyy koekäyttöön, jossa suoritetaan komponenttien kotelotäytöt. Moottorimoduulin koekäytöstä moduuli siirretään loppukokoonpanolinjalle. Siellä koneeseen kytketään letkutus ja putkitus, pääventtiililohko ja kaikki toimilaitteet ja muut toiminnot. Toiminnallisissa testeissä kaikki toimilaitteet testataan ja linjastot täyttyvät öljyllä. Tämän jälkeen hydraulioöljysäiliö täytetään ylärajaan ja keskimäärin tämä tarkoittaa noin 50 litraa hydraulioöljyä.

Kokoonpanon valmistuttua kone ajetaan loppukoekäyttöön, jossa kaikki toimilaitteet säädetään ja testataan perusteellisesti. Mittaustulokset tallentuvat sähköiseen koekäyttöjärjestelmään. Koekäytön lopussa hydraulioöljyn puhtaus tarkistetaan mittaamalla paine- ja paluuoöljyn puhtaudet online-hiukkaslaskurilla. Jos epäpuhtauksia on vähemmän kuin asetettu raja, kone on valmis pakkausta ja asiakkaalle lähettämistä varten. Mitattu puhtaustaso merkitään koekäyttöjärjestelmään ja mittaustulokset arkistoidaan.

## 4.5 Tehdasympäristö ja työtavat

Tehdasympäristö on pääosin kunnossa. Lattiat ovat hyvässä kunnossa ja niitä puhdistetaan säännöllisesti. Moottorilinnan päässä olevasta ovesta tulee sisään melko paljon pölyä kuivaan aikaan, kun ovesta kuljetaan trukeilla. Suureen pölymäärään on syynä pihan betoni- ja sorapinnoitteet, joista koneiden tela-alustat irrottavat ainesta. Lisäksi moottorilinnan vieressä on lähettämö, josta kulkeutuu puumateriaalien sahauksesta pölyä linjan puolelle puruimureista ja väliseinistä huolimatta.

Pölyn suhteen tilanne ei ole kuitenkaan huono, koska komponentit tulevat tulpattuina kokoonpanopaikoille. Hydrauliletkuasennelmissa on joko muovikalvosuojaus tai muovitulpat. Osakokoonpanoista saapuvien esiasennettujen kokonaisuuksien suojaus on hyvä, sillä niissä käytetään metallisia tulppia.

Hydrauliöljyn tankkaus suoritetaan yleisesti tankin päällä oleva metallitulppa avaamalla ja asettamalla tankkauspistooli yhteeseen. Tämä ei ole suositeltava tapa, vaan tankkaus tulisi aina suorittaa koneen paluusuodattimen läpi. Se olisi helposti mahdollista, mutta hidastaisi tankkaustapahtumaa jonkin verran. Tämä vaatisi öljyvaraston pumpun sekä siirreltävien tankkauspumppujen päivittämistä tehokkaampiin.

## 4.6 Häiriöt tuotannossa

Hydrauliikan epäpuhtauksista johtuvien vikojen alkuperän varmentaminen ei ole aina helppoa, vaan vaatii tutkimista ja työaikaa. Koneiden tuotannosta valmistumisen ollessa etusijalla jokaisen yksittäisen vian juurisyyn varmentaminen jää välillä tekemättä. Kun kone valmistuu ajallaan vaikkapa yksittäinen venttiili vaihtamalla tai ylimääräisellä huuhtelulla, ei ole tarvetta tutkia jokaista tapausta. Tutkittuja laajempia tapauksia löytyi kuitenkin joitakin.

Proportionaalisten HIC-venttiileiden jumiintumisia ilmeni koekäytössä vuoden 2013 aikana 50 kappaletta. Näistä 28 kappaletta lähetettiin erikseen puhdistukseen, josta aiheutui puhdistus- ja testauskustannuksia muutama tuhat euroa. Uusia lennätettiin Euroopasta pikatoimituksilla noin viidellä tuhannella eurolla. Tähän päälle syntyi ylimääräisistä asennuksista- ja viivästymisistä johtuneita kustannuksia noin kymmenen tuhatta euroa. Lisäksi kustannuksia syntyi laadunvalvonnan työtunneista eli yhteensä tämä yksittäinen ongelma maksoi vuodessa reilut parikymmentä tuhatta euroa. Ongelman johdosta muutettiin hieman koekäyttöprosessia, jolloin pystyttiin hieman välttämään tätä ongelmaa loppukoekäytössä. Kyseinen painetestit tehdään vain moottorimoduulin koekäytössä.

Jäähdyttimen puhaltimen hydraulimoottoreita jumiutui noin 10 kappaletta vuosina 2013-2014. Tämä johtui ilmeisesti lämpölaajenemisesta ja valmistusviasta, eli liian pienistä välyksistä, mutta epäpuhtauksien vaikutusta asiaan ei voi sulkea täysin pois.

Koekäytön aikana on myös pienihalkaisijaisia kuristimia tukkeentunut satunnaisesti. Yksittäisissä koneissa on jouduttu suorittamaan ylimääräisiä huuhteluja, koska häiriö on toistunut useita kertoja.

Muutamiiin koneisiin on vaihdettu kaikki hydrauliöljyt epäpuhtaustason pysyessä hälytysrajan yläpuolella suodattamisesta huolimatta. Tämä aiheuttaa tuotannossa erikoisjärjestelyjä ja kuluttaa tuotantoajan puskuria ja resursseja merkittävästi. Kaikista hieman isommista osien vaihdoista tai muista ylimääräisistä tehtävistä ja erikoisjärjestelyistä aiheutuu työtä ja ylimääräistä kuormitusta asentajille, työnjohdolle, laatuosastolle, ostolle, logistiikalle ja pahimmillaan suunnitteluosastolle asti.

## 5. SUORITETUT TUTKIMUKSET JA TULOKSET HYDRAULIJÄRJESTELMÄN PUHTAUDESTA

Projektin alussa oli päätetty tutkia mahdollisia epäpuhtauslähteitä mahdollisimman laajasti, pysyen kuitenkin kustannusten suhteen järkevällä tasolla. Tutkimuskohteiksi valittiin kokemuksen perusteella merkittävimmät epäpuhtauslähteet. Tarkoitus oli löytää ja eliminoida merkittävin tai muutamia merkittävimpiä tekijöitä ja näillä toimilla parantaa puhtaustilannetta mahdollisimman edullisin kustannuksin.

Komponenteista päätettiin aluksi tutkia hydrauliletkuja, koska niissä oli havaittu silminnähtävää leikkuujätettä, vaikka letkut tilataan tulppapuhdistettuina. Myös letkujen suojatulppauksissa on ollut puutteita. Muovitulpat voivat irrota varastossa käsiteltäessä ja muovikalvolla suoritettu suojaus rikkoontuu herkästi. Varsinkin isoissa yli tuuman letkuissa muovikalvosuojaus rikkoutuu useammin logistiikassa ja tällöin saattaa likaa joutua letkun sisään. Myös venttiilien ja muiden osien varastoinnissa on satunnaisia suojauspuutteita.

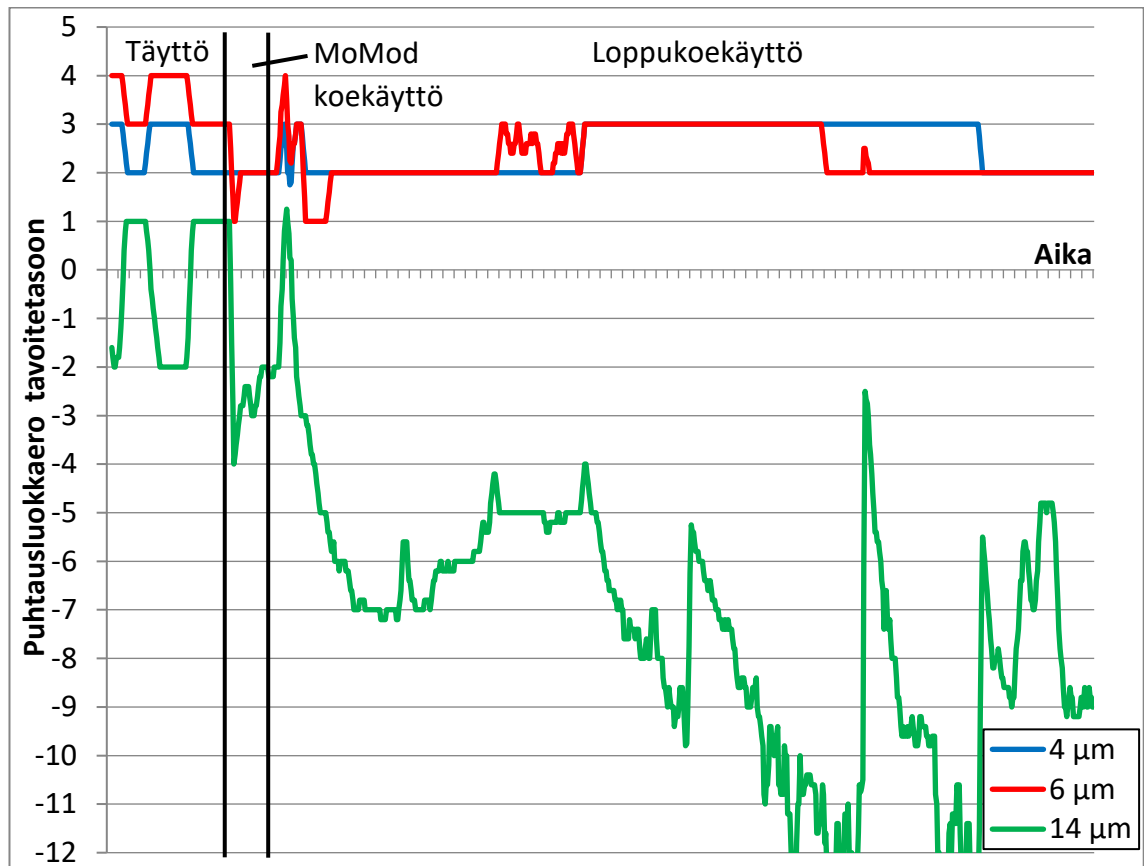
Letkujen vaikutuksen tutkimisen kanssa samaan aikaan suodatettiin uutta öljyä puhtaammaksi kuin tavallisesti, koska uuden öljyn puhtaudella epäiltiin olevan suuri merkitys. Tiheämmän paluusuodattimen vaikutusta testattiin sekä eri valmistajan paine- ja paluusuodattimia. Testikoneina oli tavallisella valmistusprosessilla valmistettuja LT106-tela-alustaisia murskaimia. Testatuista epäpuhtauslähteistä löytyi yksi, jonka vaikutus oli selkeästi suurempi ja tähän liittyviä parannuskeinoja otettiin käyttöön. Keinot eivät kuitenkaan auttaneet oletetusti ja mittauksia jatkettiin, kunnes lopullinen epäpuhtauslähde löytyi.

### 5.1 Hydrauliletkujen puhdistus

Hydrauliletkujen puhtauden vaikutuksen tutkimiseksi yhteen koneeseen tilattiin kaikki hydrauliletkut suihkupuhdistettuna. Toimittajan lupaama puhtausluokka oli ISO4406:1987: 16/12. Koneessa käytettäviä hydrauliputkia ei puhdistettu normaaliprosessista poikkeavasti, koska ne ovat tulppapuhdistettuja ja niitä ei pidetty niin suurena epäpuhtauslähteenä kuin hydrauliletkuja.

Suihkupuhdistetut letkut tulivat tulpattuina toimittajalta ja asennettiin normaaliprosessin mukaisesti. Kuvassa 13 on puhtausmittaustulokset kannettavalla hiukkaslaskurilla suoritettuna tankatusta öljystä, moottorimoduulin koekäytöstä sekä koko koneen loppukoe-

käytöstä. Aika-akselin pituus on noin 10 tuntia. Käyrissä on 30 mittauspisteen liukuva keskiarvo.

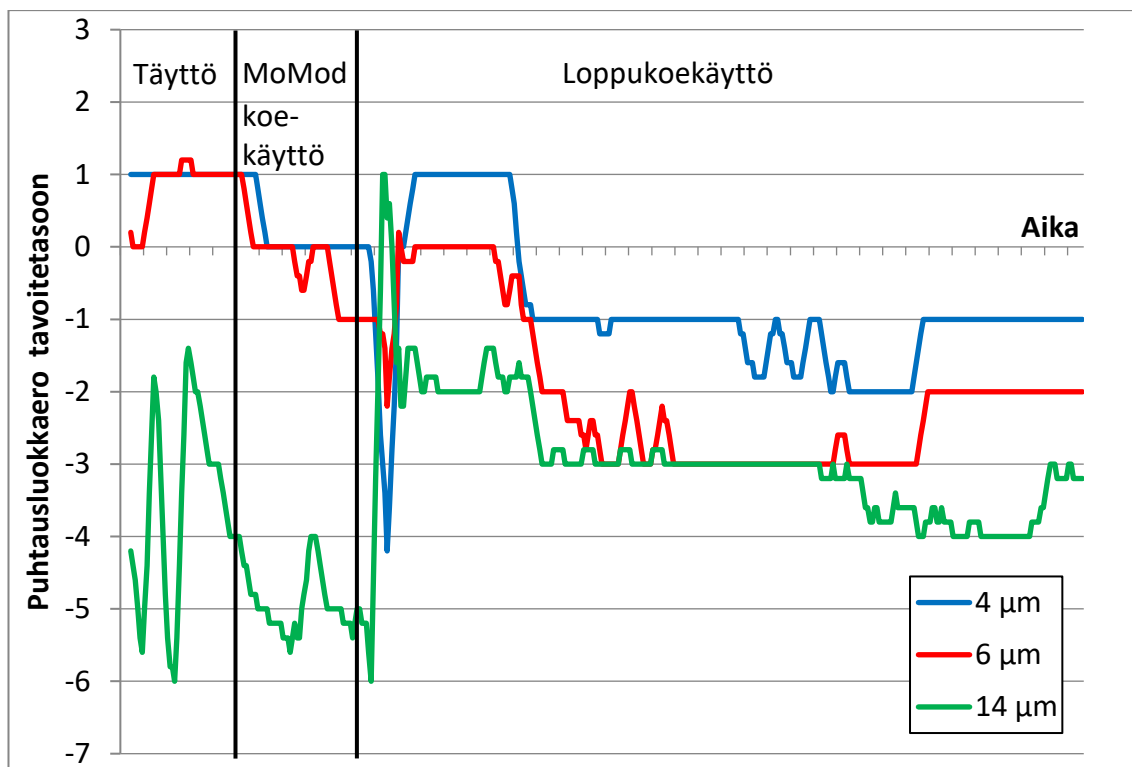


*Kuva 13. Puhtauden kehitys puhdistetuilla letkuilla.*

Kuvan pystyakselilla on mitatun puhtausluokan erotus tavoitetasoon eli hälytysrajaan. Nolla on siis tavoitetaso ja puhtaus paranee mitä negatiivisempiin arvoihin mennään. 4 µm ja 6 µm käyristä nähdään, että ne eivät merkittävästi suodatu koekäytön edetessä. Hiukkasmäärissä kahden puhtausluokan parannus on kuitenkin merkittävä. Parhaiten suodatettava 14 µm kokoluokka vaihtelee koekäyttövaiheiden ja toimilaitteiden vaihtuessa ja suodattuu noin 8 puhtausluokkaa.

## 5.2 Puhtaamman öljyn tankkaaminen järjestelmään

Ensimmäisiä tutkimuksia varten suodatettiin 1000 litran kontillinen ISO VG 46 hydrauliöljyä puhtausluokkaan ISO4406: 20/17/9. Koneen täyttäminen tällä öljyllä toi lopputulokseksi koekäytön lopussa puhtausluokkaeroina tavoitetasoon -1/-2/-3, kuten nähdään kuvasta 14.



**Kuva 14.** Puhtauden kehitys puhdistetuilla öljyillä.

Kuvaajassa 14 aika-akselin pituus on noin 7 tuntia. Kuvaajasta nähdään kaikilla puhdistusluokilla loppukoe-käytön alussa tapahtuva alkuepäpuhtauksien liukeneminen öljyyn, jonka jälkeen nämä suodattuvat -1/-2/-3 puhtautasolle. 14 µm käyrä kuvassa 15 käyttäytyy saman kaltaisesti kuin edellisissä mittaustuloksissa, mutta 4 µm ja 6 µm puhtausluokat ovat selkeästi parempia 3 – 4 puhtausluokkaa.

### 5.3 Erilaisten suodattimien vaikutus

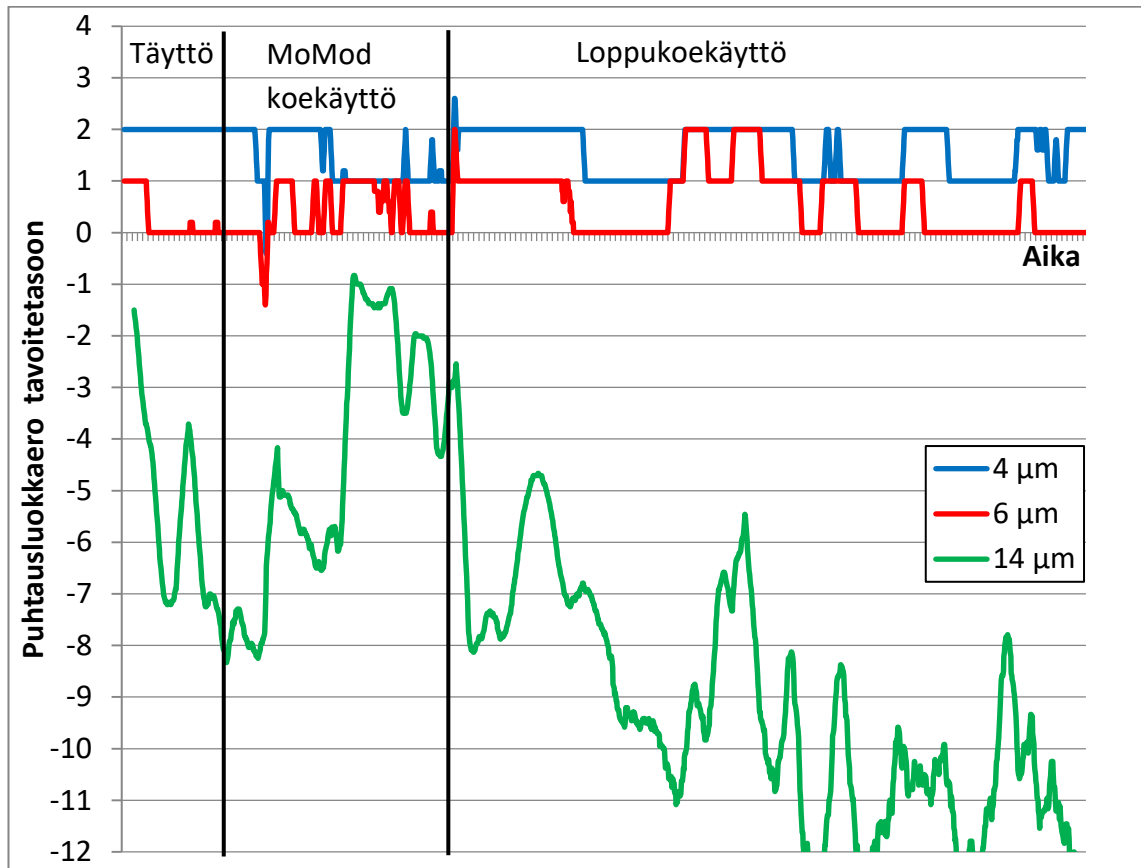
Koneiden suodattimissa ei oltu tehty muutoksia sinä aikana, kun puhtautulokset lähtivät huonompaan suuntaan. Heräsi kuitenkin epäily, että olisiko suodatintoimittajan patruunat voineet jollain tavalla muuttua. Patruunoita ei normaalin tuotantoprosessin aikana nähdä suodatinkotelojen sisältä, eikä patruunoista muutenkaan kykene silmällä näkemään mitään eroja, muuten kuin koodeista ja painatuksista. Suodattimien beeta-arvotkin ovat yleisesti parantuneet eivätkä huonontuneet.

Suunnitteluosasto oli myös kiinnostunut suodatintesteistä, kun muutamaan vuoteen ei oltu muita suodattimia testattu. Päätettiin testata nykyisen ja toisen suodatinvalmistajan suodattimia nykyisellä sekä tiukemmalla paluusuodattimen suodatustiheydellä.

#### 5.3.1 Parannettu paluusuodatus

Nykyisen suodatintoimittajan 50 % tiheämmällä paluusuodattimella varustettu kone mitattiin ja piirrettiin kuvaajat samoilla asetuksilla kuin edellä näytetyt. 14 µm käyrä

kuvassa 15 käyttäytyy samalla tavalla kuin edellisissä mittaustuloksissa, mutta 4  $\mu\text{m}$  ja 6  $\mu\text{m}$  käyrät piirtyvät tavoitetason yläpuolelle, kuten myös pestyillä letkuilla tapahtui kuvassa 13.



**Kuva 15.** Puhtauden kehitys 50% tiheämmällä paluusuodattimella.

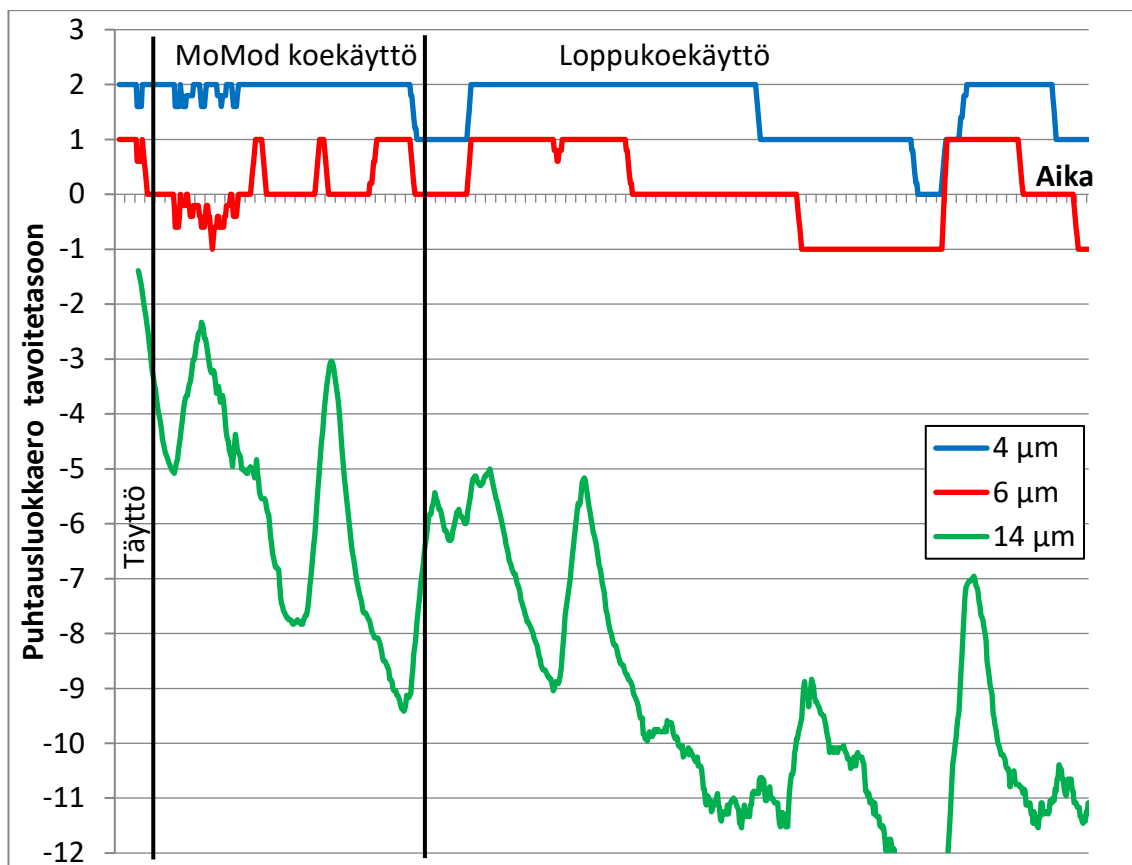
Aika-akseli on kuvassa 15 pituudeltaan noin 12 tuntia. Puhtausluokkien vaihtelu on hyvin samankaltaista kuin pestyillä letkuilla varustetun koneen mittauksissa.

Toisen valmistajan tiheämmällä paluusuodattimella tehtiin myös testit, mutta tulokset olivat hyvin vastaavia. Epäilykset paluusuodattimien laatueroista voitiin jättää huomiotta.

### 5.3.2 Erilaiset painesuodattimet

Tuotehallinnan ja suunnittelun ollessa myös kiinnostuneita, testattiin toisen valmistajan painesuodattimia. Kuvassa 16 aika-akselin pituus on noin 10 tuntia. Puhtautasojen muutokset ovat hyvin samankaltaisia kuin tiheämmällä paluusuodattimella varustetun koneen mittauksissa.





**Kuva 16.** Puhtauden kehitys eri valmistajan painesuodattimella.

Näiden neljän puhtausmittauksen perusteella selkeästi on joitain yksilöllisiä eroja koneiden välillä, mutta toisaalta eri testeillä ei saatu koneisiin tehtyihin muokkauksiin nähden johdonmukaisia tuloksia. Ainut tekijä joka paransi kahden pienimmän kokoluokan puhtaustuloksia selkeästi, oli puhtaamman öljyn tankkaaminen koneeseen kuvassa 14.

## 5.4 Korjaavat toimet

Toimenpiteitä hydraulijärjestelmien puhtaustason parantamiseksi käynnistettiin heti tämän diplomityön tekemisen aikana. Hydrauliöljyn puhtaustasojen mittaamisen ja tutkimuksien jälkeen valittiin osa-alue, jolla eniten oli merkitystä ja lähdettiin parantamaan tämän osa-alueen puhtautta. Valittujen toimien jälkeen tulokset eivät olleet kuitenkaan odotetunlaisia. Tämän jälkeen oli suoritettava lisätutkimuksia, jotka paljastivat lopullisen ongelman.

### 5.4.1 Kustannustehokkaiden toimien valinta

Mittausten perusteella uusi hydrauliöljy oli epäpuhtauslähde, jolla oli merkitystä. Tähän oli myös kohdeyrityksessä mahdollinen ratkaisu jo valmiiksi olemassa. Loppukokoonpanolinjalla oli käytössä tilavuudeltaan 1500 litrainen hydrauliöljyn päiväsäiliö, jossa

on integroituna erillinen suodatuspiiri sekä tankkauspumppu suodattimella. Päiväsäiliö oli vain tuotantoprosessien ja -tilojen muututtua jäänyt väärään paikkaan, koska loppukokoonpanossa lisätään enää vain pieni osa koneen koko hydraulijölmäärästä. Päiväsäiliö päätettiin siirtää moottorimoduulin kokoonpanolinjalle jossa 90 % hydraulijölmäärästä lisätään koneeseen. Lisäksi varastosäiliöiden huohottimeen asennettiin ilmansuodatin, koska puute oli selkeä ja ratkaisu edullinen.

#### 5.4.2 Valittujen toimien käynnistys ja todennus

Päiväsäiliön käyttöönotossa huomattiin suodatuspiirin suodattimien olevan tukossa. Suodatuspiiriä ei ollut käytetty lähiaikoina, koska sitä ei ollut ohjeistettu ja päiväsäiliön täyttöliitännässä oli myös suodatin. Suodatuspiirin 2 mikronin suodatinelementille annettiin kuukauden toimitusaika, joten säiliöön päätettiin liittää Metso-tuotenimellä valmistettu c.J.c Jensenin offline-suodatusyksikkö. Tässä suodattimessa on 3 mikrometrin absoluuttinen suodatusaste ja suodatinpatruunan epäpuhtauskapasiteetti on 8 kilogrammaa. Valmistajan mukaan kiekkomainen selluloosasuodatinelementti sitoo itseensä myös vettä.



*Kuva 17. Metso-offline -suodatin halkileikattuna.*

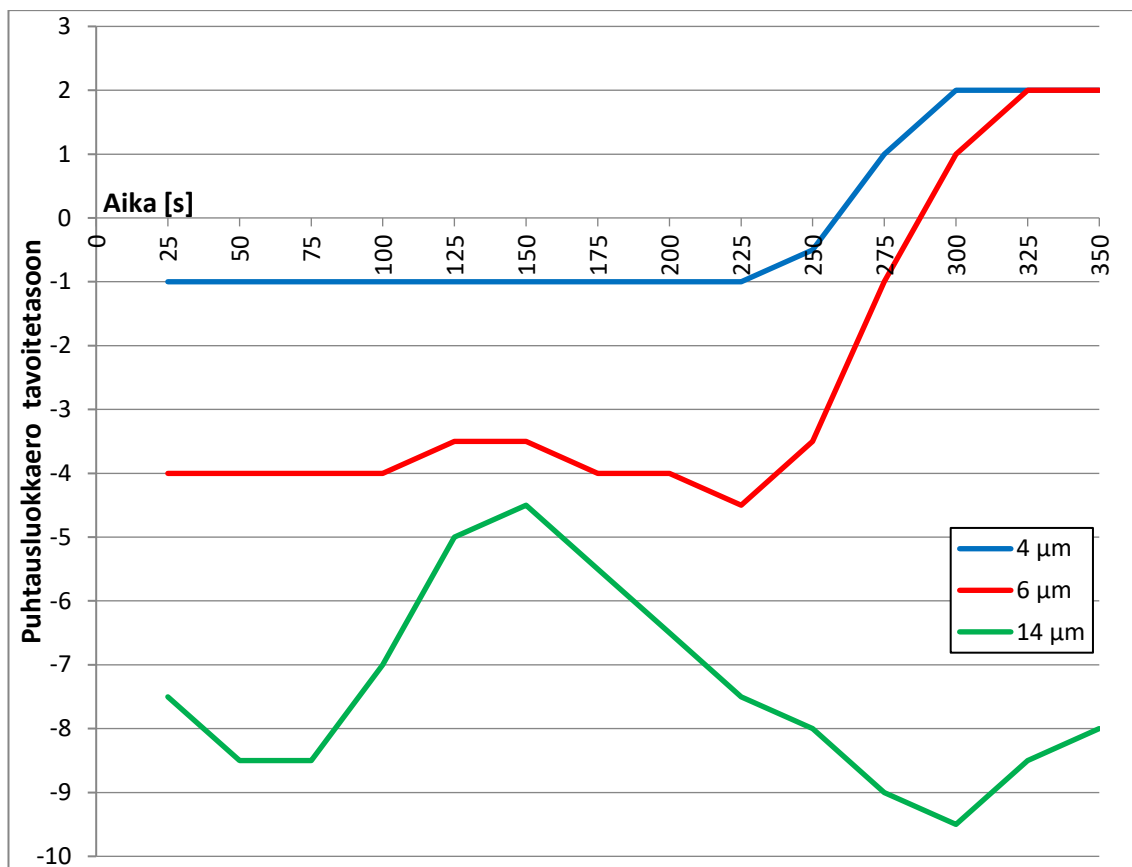
Kuvassa 17 oleva yksikkö sisältää suodattimen automaattisella ilmanpoistimella ja painemittarilla, pienehkön tilavuusvirran tuottavan pumpun, näytteenottohanan sekä säiliömäisen valuma-altaan.

Offline -suodattimen todennettiin suodattavan päiväsäiliön sisältämän öljyn vuorokaudessa puhtausluokkaan ISO4406: 17/14/8, joka on puhdasta öljyä varastolaaduksi. Koneita aloitettiin heti tankata tällä suodatetulla öljyllä, mutta oletettua selkeää puhtaustasojen parantumista koekäytön päätteeksi ei tapahtunutkaan. Muutamissa koneissa saatiin samankaltaisia parempia puhtaustasoja kuin ensimmäisessä suodatetuilla öljyillä tankatussa testikoneessa, mutta noin 7/10 koneesta parantunutta vaikutusta ei ollut havaittavissa. Aloitettiin jälleen miettimään, mistä ongelma voisi johtua.

Vesipitoisuusarvoja oli saatu öljyjen laboratorioanalyysissä, eikä niissä havaittu korkeita arvoja. Tehtaalle saatiin kuitenkin vesipitoisuusmittari, jolla pystyttiin mittaamaan juuri koekäytetyn koneen öljyn vesipitoisuutta. Arvot olivat 20 - 40 % saturaatiopisteestä, joten vesikään ei ollut ongelma. Uusista öljyistä mittari antoi lukemia samalta 20 - 40 % alueelta.

## **5.5 Hydraulioöljyn lisäaineistuksen vaikutus**

Koekäytössä mitatut puhtaustasot olivat pääosin koekäyttöhenkilöstön mittaamia, koska koekäyttötilassa ei haluta olevan ylimääräisiä henkilöitä tapaturmariskin takia. Valittujen toimien jälkeisten puhtaustasojen epämääräisten vaihtelujen takia tutkimushenkilöstön annettiin vapaammin toimia myös koekäyttötilassa. Nopeasti tutkimushenkilöstö löysikin tilanteen, jossa mittaustulokset nousivat hyppäksenomaisesti hyvältä puhtaustasolta yli 10-kertaiseen epäpuhtauskappalemääriin. Kuvassa 18 nähdään tämä nopea nousu puhtausluokkaeroina. Kun 4  $\mu\text{m}$  ja 6  $\mu\text{m}$  puhtausluokat nousevat 100 sekunnin aikana voimakkaasti, laskee 14  $\mu\text{m}$  puhtausluokka. Normaalilla epäpuhtausjakaumalla käyrien pitäisi käyttäytyä samalla tavalla, eikä muutoksen pitäisi olla eri suuntiin. Kuvajaassa aika-akselin pituus on noin 6 minuuttia.



**Kuva 18.** Puhtausluokkaerot paineliitännästä.

Tämä tilanne tuli esiin LT106-koneen koekäytön loppupuolella, hiukkaslaskurin ollessa kytkettynä hydraulipumpun ja painesuodattimen jälkeisessä korkeapainelinjassa. Sammutettaessa koneen työprosessi ja linjaston paineen laskiessa työpaineelta tyhjäkäyntipaineelle nousi epäpuhtaustaso kuvan 18 mukaisesti jopa 6 puhtausluokkaa 6 µm kokoluokassa. Tilanne toistettiin, jolloin saatiin poissuljettua paineiskun aiheuttama epäpuhtauksien irtoaminen painesuodattimesta. Tilanteessa paineenlasku on ulkoisten havaintojen perusteella rauhallista ja käynnissä olevina toimilaitteina vain hydraulimoottoreita. Useamman toiston jälkeen ei todettu muutosta epäpuhtaustason voimakkaassa vaihtelussa, vaan se toistui samanlaisena. Näin voitiin päätellä, että sama epäpuhtausmäärä ei voi joka kerta irrota painesuodattimista ja taso oli myös niin korkea, että suodattimet eivät voi päästää niin paljoa likaa irtoamaan kerralla, kuten myöskään lika ei niin nopeasti voi hävitä. Mitattavan linjan paineen noustessa ja laskiessa 4 µm ja 6 µm puhtausluokissa tapahtui selkeästi iso muutos. Tätä ei oltu aiemmin huomattu, koska normaalisti koekäytössä mitattiin puhtautta matalasta paineesta ennen paluusuodatinta.

Jo aiemmin oli epäilty vaahtoutumisenestolisäaineen vaikuttavan tuloksiin, mutta öljyn-toimittaja kertoi, ettei vaikutus ole kuin yhden puhtausluokan tasoa. Koska löydöksen syynä eivät käytännössä voineet olla epäpuhtaudet, oletettiin tässä vaiheessa syyksi öljyn sisältämä vaahtoutumisenestolisäaine. Mitattavasta koneesta otettiin välittömästi kolme pullonäytettä kolmea eri laboratoriota varten. Lisäksi näytteet otettiin kahdesta

muusta koneesta ja uusista öljyistä, jotta voitiin varmistaa, missä vaiheessa lisäaineistus alkaa vaikuttaa tuloksiin. Laboratoriotuloksista voitiin edelleen päätellä kyseessä olevan vaahtoutumisenestolisäaineen vaikutus hiukkaslaskurin anturiin, eli ns. false positive. Taulukon 4 laboratorioanalyysijä tarkastelemalla huomataan tavallisen ISO4406 hiukkaslaskennan ja ASTM D7647 mukaisesti liuotetun hiukkaslaskennan eroavan enimmillään 4 - 5 puhtausluokkaa, joka on mittaustarkkuuden puitteissa sama kuin kuvassa 18 näkyvä 3 - 6 puhtausluokka.

**Taulukko 4.** *Lisäainemäärät paljastavat laboratoriotulokset.*

Näyte			2015-039	2015-040	2015-032
Näytteen sisältö			ISO VG 68	ISO VG 68	ISO VG 46
PVM (näyte otettu tai näyte saapunut)			16.1.2015	16.1.2015	20.1.2015
Näytteenottoaika			P5	P1	3
Huomautuksia			Näyte 11	Näyte 12	Näyte 13
MÄÄRITYS	YKSIKKÖ	MENETELMÄ			
Vesipitoisuus	mg/kg	ASTM D6304	47	34	31
Pentaaniin liukenemattomat	mg/kg	InHouse	54	109	166
Tolueeniin liukenemattomat	mg/kg	InHouse	106	85	11
Puhtausluokka		ISO 4406	20/17/14	23/21/17	14/12/8
Puhtausluokka		ASTM D 7647	18/15/11	19/17/12	14/12/10
Alumiini (Al)	mg/kg	WDXRF	<1	<1	<1
Kromi (Cr)	mg/kg	WDXRF	1	<1	1
Kupari (Cu)	mg/kg	WDXRF	<1	<1	<1
Rauta (Fe)	mg/kg	WDXRF	<1	<1	<1
Lyijy (Pb)	mg/kg	WDXRF	<1	<1	<1
Hopea (Ag)	mg/kg	WDXRF	1	3	3
Tina (Sn)	mg/kg	WDXRF	<1	<1	<1
Titaani (Ti)	mg/kg	WDXRF	<1	<1	<1
Pii (Si)	mg/kg	WDXRF	5	20	4

Näistä taulukon 4 laboratoriotuloksista ja öljyntoimittajan kanssa käydyistä keskusteluista selvisi myös jo aiemmin huomiota herättänyt ISO VG68 öljyjen vaihteleva piipitoisuus, joka johtui vaahtoutumisenestoaine organosiloksaanin vaihtelevasta määrästä uudessa öljyssä. Tämä johtui virheestä öljyntoimittajan valmistusprosessissa. Lisäainetta oli päässyt öljyyn huomaamatta vaihtelevia määriä prosessitoimilaitteen rikkoutumisen takia. Virhe korjattiin ja lisättiin laadunvalvontatoimenpiteitä koskemaan jo-kaista valmistuserää. Piipitoisuus uudessa öljyssä sai olla enimmillään 5 mg/kg ja taulukon 4 2015-040 näytteessä on 20 mg/kg ja samassa näytteessä puhtausluokkaero ISO4406 ja ASTM D7647 mittaustapojen välillä on suurin.

Lopulta ongelmia aiheuttanut lisäaine vaihdettiin toiseen diplomityön käytännön osuuden jo päätyttyä. Se oli helpoin ratkaisu öljyn puhtausmittausten luotettavuuden palauttamiseksi.

## 6. TULOSTEN ANALYSOINTI JA JATKOTOIMENPITEET

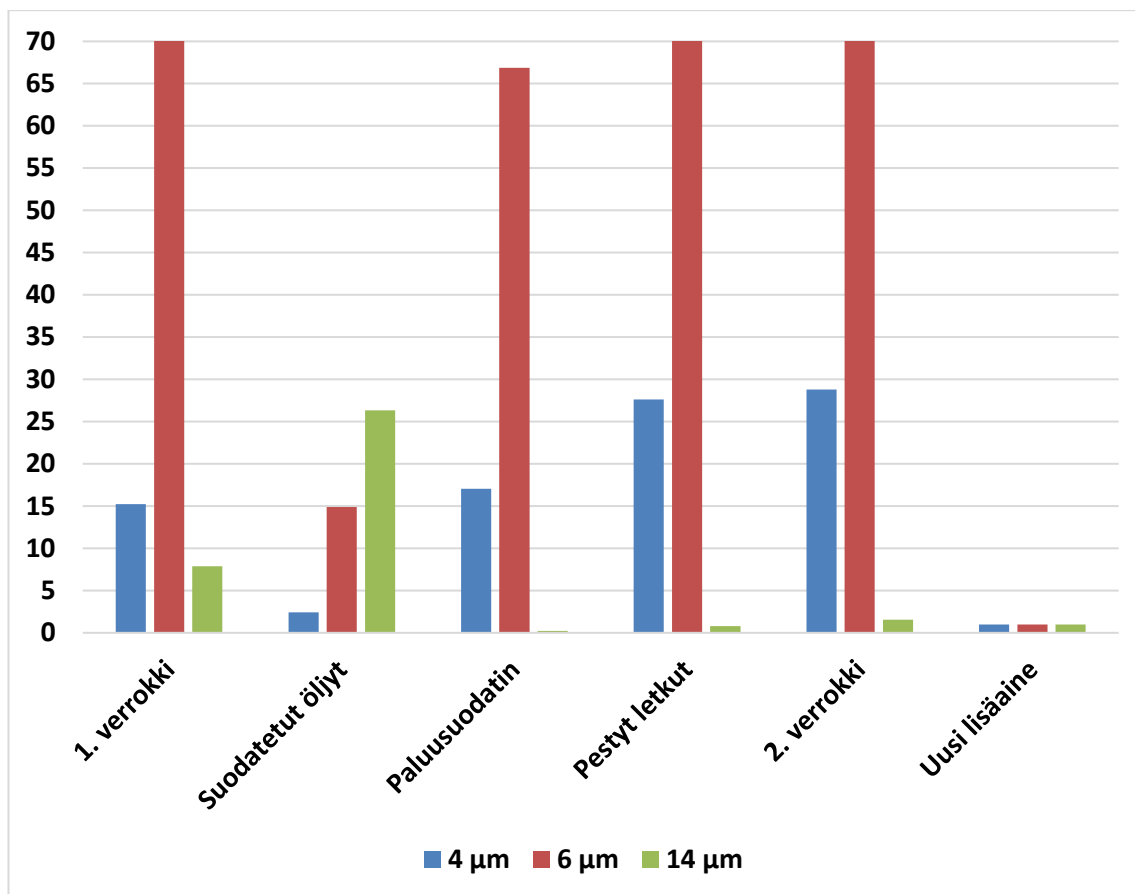
Työn saavutuksina saatiin todella paljon mittaustietoa, jota ei ole kaikkea tähän diplomityöhön liitetty. Tutkimusten ja tulosten osalta on esitetty vain ne tiedot, joilla on ongelman ratkeamisen kannalta merkitystä. Tutkimustuloksista uudella öljyn lisäaineella saadut mittaustulokset saatiin diplomityön käytännön osuuden loppumisen jälkeen.

Jatkotoimenpiteinä työn perusteella suositellaan mittauskäytäntöjen laajentamista siten, ettei vastaavaa ongelmaa pääse syntymään uudelleen. Myös yksittäisempien tehtaalla tapahtuvien häiriöiden havaitseminen täytyy olla varmaa.

### 6.1 Tutkimustuloksien vertailu

Kuvassa 19 on esitetty eri tutkittavien koneiden hiukkasmäärät suhteutettuna uudella lisäaineella valmistetulla öljyllä tankattuun koneeseen. Uuden lisäaineen öljyn hiukkasmäärä jokaiselle kokoluokalle erikseen on suhdeluku, jolla muiden koneiden vastaavan kokoluokan hiukkasmäärä on jaettu. Hiukkasmääränä on käytetty koekäytön lopusta viiden edustavan mittauspisteen keskiarvoa. Molempien verrokkikoneiden sekä pesytyillä letkuilla varustetun koneen 6 µm vertailuluku menee asteikosta yli.

Uuden öljyn puhtaus osoittautui olevan oikea valinta korjaavaksi toimenpiteeksi. Kuvan 19 käyriä yleisesti vertailemalla nähdään, että öljyn suodatus etukäteen oli ainut toimenpide, jolla merkittävästi parannettiin puhtaustulosta koekäytön päätteeksi, uudella lisäaineella täytetyn koneen lisäksi. Todennäköisesti alkuperäinen lisäaine muokkaantui jollain tavalla suodattamalla öljyä useita kertoja syväsuodattimen läpi. Jäikö lisäaine suodattimeen vai liukeniko se, on vaikea sanoa edes piipitoisuuksia vertailemalla. Tarvittaisiin tarkempia analyysijä kontrolloidummissa olosuhteissa.



**Kuva 19.** Testattujen toimenpiteiden vaikutus koneen loppupuhtauteen.

Tarkastelemalla tarkemmin kuvaa 19 voidaan todeta, että tiheämpi paluusuodatin vaikutti ainakin 14 µm kokoluokassa. Suodatetut öljyt vaikuttivat erityisesti 4 µm ja 6 µm kokoluokissa, mutta 14 µm kokoluokassa puhtaus on heikko verrattuna muihin. Tulppapuhdistusta on pidetty normaaliin konepajaan riittävänä letkujen puhdistusmenetelmänä, ja näin voidaan sanoa myös vertaamalla lähes identtisiä lukemia 2. vertailukoneesta ja pestyllä letkuilla varustetusta koneesta. Verrokeissa on tulppapuhdistetut letkut. Nähdyt letkujen leikkuujätteet häviävät koneiden yksilöllisiin epäpuhtausominaisuuksiin. Yleisestikin yksittäisten koneiden vertailu on tilastollisesti epävarmaa, mutta useilla koneilla mittausten toistaminen on keskellä konepajan normaalituotantoa vaikeaa.

## 6.2 Jatkotoimenpiteet

Tehtaalla on käynnissä alustava suunnittelu öljyvaraston modernisoinnista. Tämä diplomityö on yksi perusteluista, joiden perusteella investointipäätös öljyvarastoon tehdään. Uudistettuun öljyvarastoon on tulossa erillinen suodatuskierto hydraulioöljylle sekä jatkuva online-hiukkaslaskenta. Tämä vähentää varastoöljyn puhtausvalvontaan tarvittavaa työvoiman tarvetta. Jatkuva suodatus varastoöljylle on yleisesti suositeltua sekä parantaa valmistettavien hydraulijärjestelmien alkupuhtautta ja laadukkuutta merkittävästi.

Ennen öljyvaraston modernisoinnin toteutumista on syytä seurata nykyisen varastoöljyn puhtaustasoja. Mittaukset tulee koota yhtenäiseen tietokantaan seurannan mahdollistamiseksi. Uudella lisäaineella varustetun öljyn toimintaa tuotannossa on syytä seurata.

### **6.2.1 Puhtauden seuranta**

Hydrauliöljyn puhtaustasoja tuotannon eri vaiheissa on jatkossa seurattava vähintään kerran kuussa tapahtuvalla näytteenotolla. Näiden näytteiden tulokset on koottava tietokantaan, josta nähdään heti, jos tulokset alkavat nousta. Säännöllisiä tarkastusmittauksia on tehtävä käyttöpisteiltä myös öljyvarastoinvestoinnin jälkeen, jotta jatkuvan hiukkaslaskentapisteen jälkeen tapahtuvat ongelmat, esimerkiksi pumpun rikkoontuminen, voidaan huomata.

Koekäytön päätteeksi olevasta puhtaustasosta tehdään jo tietokantaa ja tätä käytäntöä on syytä jatkaa samalla tavalla. Uutena käytäntönä on aloitettava ainakin öljyvarastosäiliön ja tankkauslinjastosta saatavan öljyn puhtauden seuranta kuukausittain. Tehtävään tulee nimetä vastuuhenkilö ja näytteenottotapa on dokumentoitava, jotta vertailu on luotettavaa. Mittauslaitteistojen tuloksien tallentamiseen on katsottava sopivat aikavälit ja määritettävä vastuuhenkilöt. Sama toimintatapa on syytä ulottaa myös irtosäiliöissä ja koneissa toimitettavalle öljylle.

### **6.2.2 Suositus mittauksien laajentamiseksi**

Hydrauliöljyjen puhtauden valvontamittaukset olisi syytä ottaa käyttöön kaikkiin tehtaalta lähteviin koneityyppeihin, erityisesti suuriin Lokotrackeihin. Tästä olisi merkittävää hyötyä, koska myös suurissa Lokotrackeissa on ollut koekäytössä joitakin ongelmia, joissa syynä ovat epäpuhtaudet hydrauliikassa. Nykytilanteessa puhtauden parantamiseksi ei voida tehdä juuri mitään, kun ei ole tietoa millä puhtaustasolla öljyt ovat, vaikkakin kaikki koneet tankataan samasta varastosta tai toisiaan vastaavilla välineillä. Diplomityön loppuvaiheessa ensimmäisiin suuriin Lokotrack-koneityyppeihin saatiin puhtaustausmittaus lisättyä koekäyttöprosessiin.

Diplomityössä ilmenneiden tietojen perusteella olisi syytä mitata myös vaihteistoöljyjen puhtauksia kokoonpanossa, koska uutta öljyä ei suodateta lainkaan. Joitakin yksittäisiä vaihteistojen irroituskysymyksiä on myös rikkoontunut asiakkailta ja osasyynä voivat olla öljyn epäpuhtaudet. Vaihteistoöljyjen puhtaustasojen perusteella on mietittävä, tarvitseeko niitä varten hankkia suodattavat täyttölaitteistot.



## 7. YHTEENVETO

Työn ratkaistavana ongelmana oli merkittävän epäpuhtausmäärän paikallistaminen tehtaalla käytettävän hydraulioöljyn eri käsittelyvaiheista. Projektissa oli jo aloitettu mittauksia ennen diplomityön aloittamista ja mittauksia jatkettiin diplomityön käytännön osuuden loppumisen jälkeen. Työn aikana koulutettiin ja tiedotettiin henkilöstöä ja tehtiin muutoksia hydraulioöljyn suodatukseen tehtaalla.

Työssä tehtiin runsaasti puhtausmittauksia kannettavalla hiukkaslaskurilla sekä lähetettiin kymmeniä näytteitä laboratorioihin analysoitaviksi hankalasti paljastuvan ongelman ratkaisemiseksi. Koneissa testattiin suihkupuhdistettujen letkujen, esisuodatetun öljyn ja erilaisten suodattimien vaikutusta koneen valmistuksen aikaiseen sekä koekäytön päätteeksi vallitsevaan puhtaustasoon. Ainoastaan esisuodatetulla öljyllä oli merkittävää selkeää vaikutusta koneen puhtausluokkaan, joten suodatusta parannettiin tehtaalla välittömästi.

Parannettu koneen järjestelmään lisättävän öljyn esisuodatus ei kuitenkaan tuonut kaivattua parannusta jokaisella koneyksilöllä. Havaittava vaikutus sillä oli, mutta osa yksilöistä oli edelleen lähes samalla epäpuhtaustasolla kuin ennen toimenpiteitä.

Mittauksia jatkettiin edelleen ja lopulta pystyttiin toteamaan sopivan mittaustilanteen avustuksella kyseessä olevan vaahtoutumisenestolisäaineen aiheuttama mittausrvirhe. Asia varmennettiin laser-hiukkaslaskurin ja lisäaineen yhteiskäytöstä johtuvaksi mittaustekniseksi ongelmaksi tehtaan omilla ASTM D7647 -liuotusmittauksilla, laboratoriotuloksilla ja keskusteluilla öljytoimittajan kanssa. Laser-anturiin perustuva hiukkaslaskuri havaitsi ja laski lisäainetta epäpuhtaushiukkasiksi.

Ongelmaan löydettiin ratkaisu vaihtamalla vaahtoutumisenestolisäaine toisentyypiksi. Diplomityön käytännön osuuden päättymisen jälkeen ratkaisun toimivuus varmistettiin projektin toimesta. Lisäksi työn aikana tehdyt öljyn varastoimiseen ja suodattamiseen liittyvät toimenpiteet parantavat hiukkaspuhtautta koneisiin tankattavassa öljyssä.

Projektin ja diplomityön tutkimuskysymykseen saatiin vastaus. Mittauksissa havaittu merkittävä epäpuhtausmäärä oli peräisin öljyyn tarkoitettusta lisäaineesta ja luokitellaan siten mittausrvirheeksi.

## LÄHTEET

ASTM D7647-10. (2018). Standard Test Method for Automatic Particle Counting of Lubricating and Hydraulic Fluids Using Dilution Techniques to Eliminate the Contribution of Water and Interfering Soft Particles by Light Extinction. West Conshohocken, PA, ASTM International. 10 p.

Bosch Rexroth. (2014). Oil Cleanliness Booklet. Bosch Rexroth AG. 44 p. Saatavissa: [http://www.boschrexroth.com/oil\\_cleanliness\\_booklet](http://www.boschrexroth.com/oil_cleanliness_booklet).

C.C.Jensen. (2016). Clean Oil Guide. C.C.Jensen A/S. 48 p. Saatavissa: [http://www.cjc.dk/fileadmin/user\\_upload/pdf/CJC\\_Brochures/Clean\\_Oil\\_Guide.pdf](http://www.cjc.dk/fileadmin/user_upload/pdf/CJC_Brochures/Clean_Oil_Guide.pdf)

Donaldson Company. (2012). Hydraulic Filtration Technical Reference. Document number F115354 Rev. 1. Donaldson Company Inc. 28 p. Saatavissa: <http://www.emea.donaldson.com/de/ih/support/datalibrary/043246.pdf>

Exxon Mobil. (2008). Signum öljyanalyysi, kunnonvalvonnan perusteet. Exxon Mobil Corporation. 20 s. Saatavissa: <http://www.signumoilanalysis.com/signum-english/Files/signum-oil-analysis-condition-monitoring-fundamentals-finland.pdf>

ISO4406:2017, Hydraulic fluid power - Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particles. 3<sup>rd</sup> ed. Geneva, International Organization for Standardization. 6 p.

ISO11500:2008, Hydraulic fluid power - Determination of the particulate contamination level of a liquid sample by automatic particle counting using the light-extinction principle. 2<sup>nd</sup> ed. Geneva, International Organization for Standardization. 29 p.

Kauranne, H., Kajaste, J. & Vilenius, M. (2008). Hydrauliteknikka. 1. painos. Helsinki, WSOY Oppimateriaalit Oy. 487 s.

Kivioja, S., Kivivuori, S. & Salonen, P. (2010). Tribologia – kitka, kuluminen ja voitelu. 6. painos. Helsinki, Otatieto – Gaudeamus Helsinki University Press. 346 s.

Korhonen, J. Azipod –tehtaan puhtaudenhallinta. (2015). Koneenrakennuksen komponenttien puhtaus –seminaari, AEL, Helsinki.

Kurenniemi, A. (2014). Hiukkaslaskentamittaus liikkuvien kivenmurskauslaitteiden öljyn puhtauden tutkimusmenetelmänä. Tampereen ammattikorkeakoulu. 55 s. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/84187>.

Metso Media Bank. (2015). Saatavissa rajoitetusti: <http://mediabank.metso.com>.

Metso Yleisesitys. (2015). Saatavissa rajoitetusti: <http://www.metso.com>.

Terva, J., Kuluminen ja kulumiskestävyys, Hitsaustekniikka, 1/2012. Orivesi, Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry. s. 22–24. Saatavissa: [http://www.shy-hitsaus.net/portals/shy/iBooklet/2012/HT\\_1\\_12/files/assets/basic-html/page24.html](http://www.shy-hitsaus.net/portals/shy/iBooklet/2012/HT_1_12/files/assets/basic-html/page24.html).

Törmä, Mika. (2015). Lokomo 100 vuotta konepaja- ja terästeollisuutta. 1. painos. Tampere, Metso Minerals Oy. 232 s.